

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh softwarové aplikace pro měření útlumových charakteristik optických vláken

Software Design of Application for Measuring of Attenuation Characteristics of Optical Fibers

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Nikola Vrbínarová**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie

Téma: **Návrh softwarové aplikace pro měření útlumových charakteristik optických vláken**
Software Design of Application for Measuring of Attenuation Characteristics of Optical Fibers

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Student bude mít za úkol v rámci této diplomové práce realizovat softwarovou aplikaci v prostředí LabView. Tato zhotovená aplikace bude přes komunikační programovatelná rozhraní řídit optické přepínače, kterými bude možné libovolně volit mezi různými typy LD zdrojů o různých vlnových délkách a dále vybírat až 8 měřených vzorků bez nutnosti odpojení přístroje od testovaného vzorku. Na základě naměřených údajů uměle stárnutých optických vláken bude aplikace vykreslovat útlumové charakteristiky různých typů optických vláken do přehledných grafů s časovou osou. Zároveň bude z naměřených dat daná aplikace vyhodnocovat základní statistické údaje. Výsledná aplikace bude použita pro testovací měření ve spolupráci s Ústavem jaderného výzkumu ŘEŽ, kde bude rovněž student měřit reálně vliv umělého stárnutí na útlumové parametry optických vláken.

1. Obecný popis struktury optického vlákna.
2. Rozbor metod měření útlumu na optických trasách.
3. Návrh aplikace pro vyhodnocování naměřených hodnot útlumu v softwarovém prostředí LabView.
4. Měření útlumu na různých typech optických vláken pomocí naprogramované aplikace.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot dosažených z práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] FILKA, M. Optoelectronics for telecommunications and informations. Texas: Inc., Publishers, 2009. ISBN 978-0-615-33185-0
- [2] MITSCHKE, Fedor. Fiber Optics: Physics and Technology. London : Springer, 2010. 392 s. ISBN 978-3-642-03702-3.
- [3] FOLEA, Silviu, ed. Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software. InTech, 2011. ISBN 978-953-307-650-8.
- [4] RONALD W. LARSEN. LabVIEW for engineers. International ed. Boston, Mass ; London: Pearson, 2010. ISBN 9780135121405.

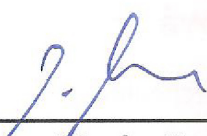
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019






prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracovala samostatne. Uviedla som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpala.

V Ostrave dňa: 27. dubna 2019


.....

Vytvorenie diplomovej práce vyžadovalo spoluprácu, odborné rady a pozorné vedenie. Poďakovanie patrí pánom Ing. Janovi Látalovi Ph.D. a Ing. Lukášovi Hájkovi za vedenie počas celého obdobia tvorby diplomovej práce a taktiež pánom inžinierom z laboratória optických komunikácií za ich pomoc. Rovnaká vďaka patrí pánovi Ing. Petrovi Havránkovi a jeho kolegom za odborný dohľad počas meraní v ÚJV-Řež.

Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „BroadbandLIGHT – ověřování možností využití technologií instalovaných na SMART polygonu veřejného osvětlení & Nové vláknově optické technologie pro komunikace a senzory“, reg. č.: SP2019/143 a SP2019/80 Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Abstrakt

Práca sa zaoberá vytvorením aplikácie pre zaznamenanie a spracovanie hodnôt útlmu vznikajúceho na optických trasách. Aplikácia je tvorená v softwarovom prostredí programu LabView s využitím dostupných nástrojov a funkcií, ktoré ponúka pre tvorbu meracích systémov. Zámerom je uľahčiť meranie za špecifikovaných podmienok a využitie dostupných prístrojov a vhodnej technológie.

Útlm je parameter objavujúci sa pri prenose svetla optickým vláknom. Meranie hodnoty útlmu umožňuje získať povedomie o použiteľnosti optického vlákna pri zohľadnení špecifických podmienok, ktoré vedú k jeho nárastu. V tomto prípade sa jedná o podmienky vedúce k umelému starnutiu optického vlákna, presnejšie o vplyv radiačného žiarenia a vystavenie optického vlákna dávkam gama žiarenia.

Zhotovený merací systém je určený pre meranie vybraných optických vlákien, ktoré sú vystavené radiačnému žiareniu a umožňuje monitorovať a zaznamenávať hodnoty výkonu počas celého procesu ožarovania. V rámci diplomovej práce sa uskutočnilo meranie na pracovisku ÚJV - Řež pomocou zhotoveného meracieho systému a vytvorenej aplikácie. Výsledky merania sú v práci bližšie popísané a vyhodnotené.

Kľúčové slová: LabView, optické vlákno, útlm, gama žiarenie, optický prepínač, výkon, meranie

Abstract

The thesis is about design of the application for measurement and monitoring the attenuation of optical fiber. Labview was used as a programme development environment for design of the application. This software offers common measurement tools and functions to build instruments for hardware communication, measurement and control.

Attenuation is a parameter of optical fiber and it is a result of glass fiber absorbing the energy of the light during transmission. By measurement of attenuation we may specify the conditions or environment for optical fibers usage and consider the specific conditions that lead to attenuation growing. In this case, it's about the terms that lead to accelerated aging of optical fiber, to be more specific due to radiation and gamma radiation influence.

The purpose of the measurement system is to measure the value of output power of the selected optical fibers, which are exposed to radiation and monitor them during the entire process.

The final part of the work was the measurement realization in ÚJV - Řež, via the measurement system and created application. The result of this part is visualization of data gained by measurement and data analysis.

Key Words: LabView, optical fiber, attenuation, gama radiation, optical switch, power, measurement

Obsah

Zoznam použitých skratiek a symbolov	9
Zoznam obrázkov	11
Zoznam tabuliek	13
1 Úvod	14
2 Všeobecný popis optického vlákna	15
2.1 Optické vlákno	15
2.2 Výrobný materiál optického vlákna	15
2.3 Parametre a typy optických vlákien	17
2.3.1 Multi-mode vlákna	18
2.3.2 Gradientné vlákno	18
2.3.3 Single-mode vlákno	19
2.4 Špecifikácie vlákien	19
2.4.1 Typy a špecifikácie použitých vlákien	20
3 Rozbor metód merania útlmu na optických trasách	22
3.1 Útlm optického vlákna	22
3.1.1 Absorpcia	22
3.1.2 Rozptyl	22
3.1.3 Ohybové straty	24
3.2 Metódy merania útlmu optického vlákna	25
3.2.1 Metóda dvoch dĺžok (Cut-Back Method)	26
3.2.2 Metóda vložných strát (Insertion-Loss Method)	26
3.2.3 Metóda spätného rozptylu (Back-scattering Method)	27
4 Starnutie optických vlákien a vplyv radiačného žiarenia	30
4.1 Starnutie optických vlákien	30
4.2 Radiačné žiarenie	31
4.2.1 Gama žiarenie	32
4.2.2 Vplyv radiačných dávok na materiál	32
4.3 Radiačné žiarenie a jeho vplyv na optické vlákna	34
5 Návrh meracieho systému a aplikácie	35
5.1 Prístroje	36
5.2 Návrh aplikácie pre meranie výkonu na pripojených optických vláknach s použitím zhotoveného meracieho systému	42

5.3	Ovládanie aplikácie, konfigurácia merania	43
6	Meranie útlmu na vybraných optických vláknach pomocou naprogramovanej aplikácie	46
6.1	Príprava merania	46
6.2	Meranie na pracovisku v ÚJV, Řež	47
6.2.1	Merania v ožarovni	48
6.3	Výsledky merania	51
6.3.1	Merania relaxácie	60
7	Záver	66
	Literatúra	68
	Prílohy	70
A	Aplikácia	71
A.1	Zdrojový kód aplikácie	71
A.2	Verzia aplikácie	71
A.3	Konfigurácia merania	71
B	Dokumentácia k použitým prístrojom	71
C	ÚJV - Řež	71
C.1	Fyzikální podstata ozařování	71
C.2	Dáta z meraní	71
C.3	Záznam teploty	71

Zoznam použitých skratiek a symbolov

APD	– Avalanche Photodiode
CWDM	– Coarse Wavelength Division Multiplex
DPS	– Printed Circuit Board
DWDM	– Dense Wavelength Division Multiplexing
FWHM	– Full width at half maximum
FWM	– Four-wave mixing
GI	– Graded-index optical fiber
IEC	– International Electrotechnical Commission
IL	– Insertion Loss
ITU	– International Telecommunication Union
ITU-T	– ITU Telecommunication Standardization Sector
LAN	– Local Area Network
LD	– Laser Diode
MFD	– Mode Field Diameter
MM	– Multi-mode optical fiber
NZDSF	– Non Zero dispersion-shifted fiber
OTDR	– Optical Time-Domain Reflectometer
PCS	– Plastic Clad Silica
PMD	– Polarization Mode Dispersion
PMMA	– Polymethylmethacrylat
POF	– Polymer Optical Fiber
PVC	– Polyvinylchlorid
SM	– Simple-mode optical fiber
TDMS	– Technical Data Management Streaming
ÚJV	– Ústav jaderného výzkumu
WDM	– Wavelength-Division Multiplexing
ZWP	– Zero Water Peak
a	– strata výkonu [dB]
A	– útlm [dB·km ⁻¹]
c	– rýchlosť svetla vo vákuu [m·s ⁻¹]
d	– priemer [μm]
D	– absorbovaná dávka [Gy]
E	– energia [eV]
f	– frekvencia [Hz]
h	– Planckova konštanta [J·s]
I_{max}	– max. intenzita optického výkonu [W]

K	– konštanta úmernosti
l	– dĺžka [m]
L	– dĺžka [m]
m	– hmotnosť [kg]
n	– index lomu [-]
NA	– numerická apertúra
p	– hybnosť [kg·m·s ⁻¹]
P	– výkon [W]
S	– koeficient spätného rozptylu
SiO_2	– oxid kremičitý
T	– teplota [°C]
t	– čas [s]
V	– normalizovaná frekvencia
v_g	– skupinová rýchlosť šírenia
λ	– vlnovlnová dĺžka [nm]
γ	– stredná hodnota pre Rayleigho rozptylový koeficient pre l
γ_R	– Rayleigho rozptylový koeficient
θ	– max. uhol dopadu

Zoznam obrázkov

1	Prierez optickým vláknom. n_j - index lomu jadra, n_p - index lomu plášťa.	15
2	Naviazanie optického výkonu na vstupe do vlákna.	17
3	Šírenie žiarenia MM a GI vláknom.	18
4	SM optické vlákno, skoková zmena indexu lomu. Profil SM vlákna.	19
5	Straty vo vlákne [31].	24
6	Pôsobenie ohybu [32].	25
7	Metóda dvoch dĺžok.	26
8	Metóda vložných strát, varianta 1a.	27
9	Reflektometer a spracovanie signálu.	28
10	Metóda spätného rozptylu.	29
11	Návrh meracieho systému.	35
12	Schéma zapojenia pre riadenie optických prepínačov.	36
13	Zhotovené zapojenie pre riadenie optických prepínačov.	36
14	Spektrálna analýza v software OSA pre vlnovú dĺžku 1550 nm.	37
15	Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon pred zvarom.	39
16	Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon na vstupe pre časť panelu IN. Hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.	40
17	Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon na vstupe pre časť panelu OUT a za optickým deličom.	40
18	Schématický náčrt pre zhotovený merací systém.	41
19	Zostrojená doska s meracím systémom.	41
20	Programová štruktúra.	43
21	Vykreslenie dát zo súboru.	44
22	Hlavný panel aplikácie.	45
23	Schéma meracieho systému s pripojenými vláknami.	46
24	Valec s optickými vláknami.	49
25	Vyvedenie prepojujúcich vlákien zo šachty.	50
26	Vloženie valca s vzorkami do oblasti žiariča.	50
27	Monitorovacie pracovisko.	51
28	Graf z aplikácie po prvom dni merania.	51
29	Konektor prepojujacieho vlákna po ukončení ožarovania. Ferula pripojená k ožarovanej vzorky stmavla.	52
30	Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1310 nm.	52
31	Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1470 nm.	53
32	Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1550 nm.	53
33	Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1610 nm.	54
34	Vlákno S1 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.	56

35	Vlákno S1 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.	56
36	Vlákno S2 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.	57
37	Vlákno S2 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.	57
38	Vlákno S3 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.	58
39	Vlákno S3 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.	58
40	Vlákno S4 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.	59
41	Vlákno S4 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.	59
42	Presunutie merania z ožarovne do laboratória.	60
43	Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1310 nm.	61
44	Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1470 nm.	61
45	Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1550 nm.	62
46	Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1610 nm.	62

Zoznam tabuliek

1	Parameter útlmu pre vlákno ITU-T G.652.D.	20
2	Vlákna G.652.D a G.655 a ich parametre.	21
3	Spektrálna analýza pre vlnové dĺžky zdroja.	38
4	Výkon na vstupe do pripojených vlákien, časť IN.	39
5	Hodnoty výkonu na výstupe jednotlivých častí systému. Výkon P_{out_6} S7 sú hodnoty na výstupe pripojeného vlákna v časti OUT.	40
6	Vlákna použité pre meranie.	47
7	Časový záznam o priebehu merania v ožarovni.	49
8	Výsledky meraní OTDR.	54
9	Výsledky meraní OTDR s hodnotami vložného útlmu meraného vlákna.	55
10	Porovnanie výkonu počas fáz merania.	63
11	Porovnanie hodnôt útlmu počas oboch fáz merania, ožarovaní a relaxácii materiálu.	64

1 Úvod

Diplomová práca sa zaoberá návrhom softwarovej aplikácie pre vyhodnocovanie útlmu optických vlákien. Cieľom je vytvorenie aplikácie, ktorá bude zaznamenávať hodnoty výkonu na výstupe pripojených optických trás a použiť získané hodnoty pre vytvorenie útlmovej charakteristiky.

Aplikácia je tvorená v programovacom prostredí LabView. LabView je vývojové prostredie zameriavajúce sa na tvorbu meracích systémov, systémov pre testovanie, riadenie a pre komunikáciu a kontrolu hardwaru.

Návrh meracieho systému je bližšie špecifikovaný v popise praktickej časti, samotná aplikácia bola prispôbená požiadavkám návrhu. Medzi hlavné voliteľné parametre pre meranie patrí voľba vlnovej dĺžky použitého optického zdroja žiarenia a výber meraného optického vlákna, pričom merací systém umožňuje pripojiť celkom osem optických vlákien.

Výstupom je grafické spracovanie nameraných a získaných hodnôt výkonu počas priebehu merania a taktiež spätné vykreslenie už získaných dát. Meranie je automatizované, v zmysle, že po nastavení parametrov a spustení merania, bude prebiehať, pokiaľ nie je ukončené v rámci nastavenia celkového času merania alebo ukončené užívateľom. Zároveň nie je nutný zásah a manipulácia so zapojenými vzorkami vlákien, pokiaľ postačí úprava parametrov či konfigurácia merania. Výsledkom práce by malo byť vytvorenie funkčného meracieho systému.

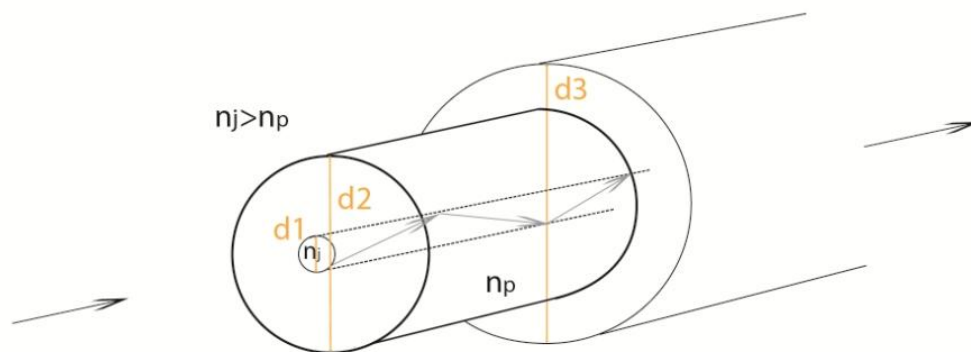
Teoretická časť sa zaoberá rozborom optických vlákien, a to šírením svetla optickým vláknom a základným popisom štruktúry vlákna. Ďalej parametrami optického vlákna, útlmom, metódami pre meranie útlmu s odkazom na príčiny vzniku a nárastu útlmu. Obsah dopĺňa časť o materiáli, ktorý sa používa pre výrobu optických vlákien s prepojením na výrobný proces. Bližší pohľad na materiál a jeho povahu je uvedený z dôvodu, že v práci sú sledované vplyvy žiarenia, ktorého dopad na látku dokáže vyvolať zmeny v atómovej štruktúre látky. Časť textu sa venuje vplyvom vedúcim k umelému starnutiu optického vlákna, presnejšie vplyvu pôsobenia radiačného žiarenia na materiál. Cieľom je nadviazať na tému využitia optických vlákien v špecifikovanom prostredí a pôsobenie radiačnej energie vo forme gama žiarenia na prvky optickej siete. Ďalšia časť je popisom tvorby samotnej aplikácie a meracieho systému. Merací systém pozostáva z prístrojov uvedených v piatej kapitole, pričom v prílohe je priložená dokumentácia k použitým prvkom. Nasleduje popis použitia a možnosti aplikácie pri zadávaní vstupných parametrov a spracovaní výstupných hodnôt.

Samostatnú časť predstavuje uplatnenie aplikácie a meracieho systému v praxi so získanými závermi z merania. Okrem testovania funkčnosti systému a aplikácie sa merací systém použil pre merania vplyvu radiačného žiarenia na optické vlákna, ktoré prebiehalo na pracovisku v ÚJV-Řež. Meranie prebiehalo v dvoch fázach. Prvou fázou bolo sledovanie vplyvu ožiarovania a v druhej fáze sa sledoval proces relaxácie materiálu optického vlákna po ožarovaní.

2 Všeobecný popis optického vlákna

2.1 Optické vlákno

Optické vlákno je vlnovod, typicky s kruhovým prierezom, cez ktoré je svetlo šírené zo vstupného konca prierezu vlákna na jeho výstup. Princíp šírenia je založený na totálnom odraze na rozhraní dvoch optických prostredí. Prostredie vlákna tvorí jadro a plášť, líšiace sa veľkosťou parametra index lomu n a taktiež svojim priemerom. Konštrukcia vlákna sa podieľa na určení prenosových vlastností optického vlákna. Vlákno pozostávajúce z dvoch vrstiev materiálového prostredia, jadra a plášte optického vlákna, určených pre vedenie signálu, je pokryté ochrannými vrstvami. Sú nimi primárna ochrana a ďalšie ochranné vrstvy nad plášťom vlákna, ktoré sa nepodielajú priamo na šírení signálu vláknom (obr. 1).



Obr. 1: Prierez optickým vláknom. n_j - index lomu jadra, n_p - index lomu plášte.

Charakteristické hodnoty pre rozmery vlákna:

$d_1 = 8 - 10 \mu\text{m}$	jadro SM vlákna, MM - $50 \mu\text{m}$; $62.5 \mu\text{m}$
$d_2 = 125 \mu\text{m}$	plášť
$d_3 = 250 \mu\text{m}$	primárna ochrana
$d_4 = 0,25 - 1 \text{ mm}$	sekundárna ochrana [17]

2.2 Výrobný materiál optického vlákna

Ako jeden zo základných materiálov pre výrobu optického vlákna sa používa kremičité sklo, SiO_2 . Kremeň je považovaný za jeden z najčistejších minerálov, a to z dôvodu malého množstva iónov schopných nahradiť Si^{4+} v krištáľovej štruktúre [18]. Najpoužívanším materiálom pre výrobu optických vlákien je syntetický kremeň ako jeden z veľmi čistých kremeňov s obsahom znečisťujúcich látok pod $40 - 50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ [18]. Pre sklenené optické vlákno platí, že hodnoty útlmu

sú v rozsahu vhodnom pre prenos signálu a komunikáciu a z hľadiska výroby je kremičité sklo dostupným materiálom.

SiO_2 v čistej podobe sa používa na výrobu jadra optického vlákna. Okrem kremičitého skla samotného sa uplatňujú aj prímеси (obsahujúce napr. prvky Ge, P, B, F, N) pre dosiahnutie zmien indexu lomu v jadre ako aj v plášti vlákna. Oboje, jadro i plášť bývajú dopované za účelom vytvoriť vlákno s potrebnými prenosovými vlastnosťami.

Dopanty ako GeO_2 , P_2O_5 sa používajú pre navýšenie indexu lomu materiálu a sú vhodné pre dopovanie jadra. Pre plášť sa používa B_2O_3 a F, ktoré znižujú hodnotu indexu lomu. Pri vzniku optického vlákna sú rovnako zvažovanými parametrami profil indexu lomu, množstvo dopantov a rozmery jadra a plášťa vlákna [15].

Ako dopanty sa uplatňujú i prvky vzácnych zemín (napr. ióny Er, Yb, Tm) za účelom dosiahnutia požadovaných vlastností optického prvku siete, akým sú napríklad zosilňovače alebo vysoko výkonné vláknové lasery.

Umelým materiálom pre výrobu vlákna bývajú rôzne polyméry. POF (Polymer Optical Fibers) sú sprevádzané vyššími hodnotami útlmu (desiatky $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$) a preukazujú odolnosť voči teplote 200 - 300 °C [4]. Plastové vlákna majú plášť i jadro z polymérových materiálov. Najčastejšie je jadro vytvorené z polymethylmethacrylatu PMMA, pokryté plášťom dopovaným flórom, $n_j=1,492$ a $n_p=1,46$. Priemer POF je typicky 1000 μm , pričom je priemer jadra rovný 980 μm . Rozdielom medzi sklenenými vláknami a POF je vo väčšej flexibilitě POF, náchylnosti k poškodeniu. Z hľadiska využitia sa jedná o multimódové vlákna, používané na malú vzdialenosť pri prenose, v LAN sieťach [8].

PCS (Plastic Clad Silica) vlákna sú typom vlákna s jadrom z čistého kremenného skla SiO_2 a plášťom z polyméru - silikónovej živice. Sú to MM vlákna o priemere jadra 200 μm , s merným útlmom 10 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ pri vlnovej dĺžke 850 nm a so skokovou zmenou indexu lomu. Používajú sa na kratšie vzdialenosti rádovo stovky metrov. Tento typ vlákna má väčší priemer jadra a vyššiu numerickú apertúru, čo znamená ľahšiu manipuláciu [10]. Uplatňujú sa ako vláknové optické senzory.

Optické vlákna majú na sebe nanesenú primárnu vrstvu - plastický obal, bežne zhotovený zo silikónovej živice, ktorá zaručuje odolnosť pred chemickými vplyvmi a pevnosť v ťahu. Sekundárna ochrana vlákna môže byť tesná, tvorená tvrdou plastickou hmotou a kevlarovým opradením, alebo voľná, vo forme dutiny, ktorá býva vyplnená gélom. Vlákna so sekundárnou ochranou sú konštrukčnými zložkami optického kábla. V kábli sa navíjajú okolo základného jadra. Kábel je vybavený spevňujúcimi prvkami. Ako izolačný materiál sa používajú polyméry (polyester, polypropylén, nylon, polyetylén) pre žily a plášte káblov. Ochranný materiál vlákna závisí od typu a výrobcu, taktiež na prostredí a podmienkach, pre ktoré je vlákno určené. Rozdiel je vo vonkajšom alebo vnútornom použití, a to znamená pridávanie rôznych typov ochrán pre vlákno [13]. Výrobný proces vplýva na prenosové parametre vlákna. Pozostáva z dvoch fáz, a to prípravy preformy a ťahania vlákna. Zatiaľ čo vlastnosti preformy sa prejavujú na hodnotách útlmu a

disperznej charakteristike vlákna, proces ťahania vlákna má dopad na geometriu vlákna a jeho pevnosť [15].

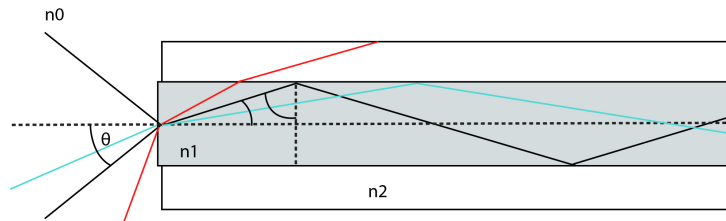
2.3 Parametre a typy optických vlákien

Medzi vybrané parametre vlákna, na ktorých stojí následné delenie vlákien, patrí normalizovaná frekvencia. Normalizovaná frekvencia V ako parameter vlákna dokáže stanoviť prenosové možnosti vlákna, počet módov, ktoré sa budú vláknom šíriť.

$$V = \frac{d\pi NA}{\lambda} \quad (1)$$

Vo vzťahu je d priemer jadra vlákna, NA numerická apertúra a λ vlnová dĺžka žiarenia. Numerická apertúra NA ako bezrozmerná veličina určuje schopnosť naviazať svetlo do jadra optického vlákna. Taktiež je možné hovoriť o numerickej apertúre ako o maximálnom uhle dopadu zväzku na plochu čela vlákna, ktoré vstupuje do vnútorného prostredia vlákna. Index lomu n , alebo optická hustota materiálu, je pomerom šírenia svetla vo vákuu a v danom prostredí. V uvedenom vzťahu je n index lomu vonkajšieho prostredia a uhol θ , maximálny uhol dopadu, pod ktorým svetlo dopadá na čelo vlákna a dochádza k jeho šíreniu (obr. 2).

$$NA = n \cdot \sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$



Obr. 2: Naviazanie optického výkonu na vstupe do vlákna.

Pokiaľ je hodnota $V \leq 2.405$, jedná sa o SM, pri vyššej hodnote ide o MM vlákno. Normalizovaná frekvencia stanovuje vzťahový pomer jednotlivých veličín, kedy jadro vlákna je tak malé voči vlnovej dĺžke, že je ním vedený len jeden mód.

Optické vlákna a ich základné delenie spočíva v rozlíšení počtu požadovaných módov vedených vláknom a v stanovení hodnoty indexu lomu pre jadro a plášť vlákna.

- Multi-mode vlákno (MM) s konštantným indexom lomu jadra a skokovou zmenou indexu lomu plášťa.
- Multi-mode vlákno (GI) s premenným indexom lomu v pričnom priereze vlákna, označované ako gradientné vlákno.

- Single-mode vlákno (SM) s konštantným indexom lomu jadra a skokovou zmenou indexu lomu plášťa.

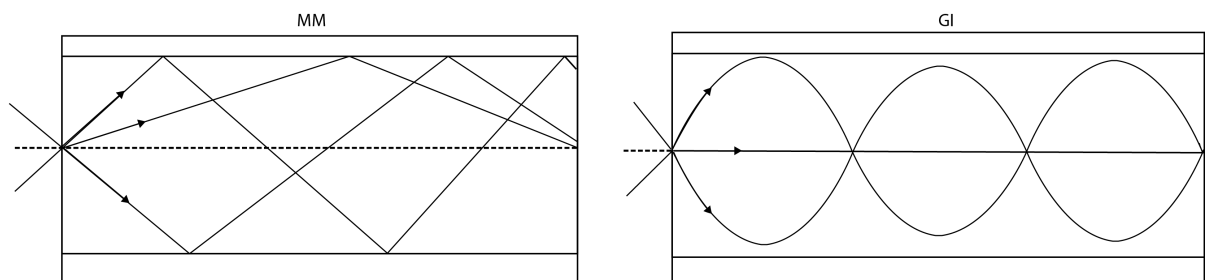
2.3.1 Multi-mode vlákna

MM vlákna s priemerom jadra blízky 50 μm sú schopné prenášať viacero módov súčasne. Multimódové vlákna sa používajú pre prenosové vzdialenosti v jednotkách km, sú určené pre bežné použitie. Fungujú na princípe totálneho odrazu na rozhraní jadra a plášťa. Vláknom sa šíri súčasne viacero módov po vlastných dráhach.

Vstupujúci pulz svetla môže byť kvôli rôznym módovým dráham na výstupe vlákna rozšírený, dochádza k vzniku módovej disperzie. Tá je typickým nežiaducim efektom, prejavujúcim sa v MM vláknoch. Vyslaný signál je na výstupe z vlákna posunutý v čase. Dôsledkom je medzisymbolová interferencia, ktorá rozhoduje o veľkosti vzdialenosti medzi vysielanými pulzami [22]. Módová disperzia spôsobuje zmenšenie šírky prenosového pásma. V štandarde organizácie IEC (International Electrotechnical Commission) ISO/IEC 11801 pre určenie všeobecného účelu telekomunikačných káblových systémov je kategorizované MM vlákno podľa parametrov na OM1 - OM3 [5]. Je tu stanovený útlm na hodnotu $3,5 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ pre 850 nm, $1,5 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ pre prenos na vlnovej dĺžke 1300 nm a priemer jadra vlákna na 50/62,5 μm , s minimálnou šírkou prenosového pásma v stovkách MHz. Okrem uvedenej kategorizácie existuje viacero noriem IEC venujúcich sa optickým vláknam, metódam merania a testovaniu vlákien.

2.3.2 Gradientné vlákno

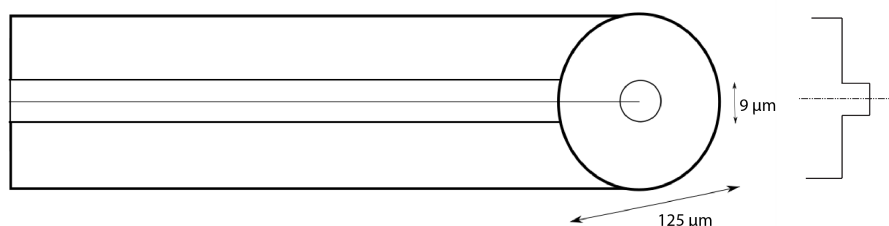
GI gradientné vlákno má špecifickú úpravu profilu indexu lomu jadra. Konštrukcia jadra pozostáva z vrstiev, sústredných kruhov. Líšia sa parametrom indexu lomu, ktorý sa smerom k plášťu vlákna znižuje. Vďaka tomu dochádza k úprave šírenia svetla vláknom, keďže vo vrstve s nižším indexom lomu vzdialenejšej od jadra je rýchlosť šírenia navýšená (obr. 3). Na rozhraní jadra a plášťa dochádza k postupnému odrazu dopadajúceho svetla. Priemer jadra býva 50 μm , častejšie však 62,5 μm . Využíva sa pre prenos na vlnových dĺžkach 850 nm a 1300 nm.



Obr. 3: Šírenie žiarenia MM a GI vláknom.

2.3.3 Single-mode vlákno

SM je určené na šírenie jedného módu vláknom, umožňujú to rozmery jadra, ktorého priemer je blízky $9\ \mu\text{m}$. Zmena v indexe lomu medzi jadrom a plášťom je v medziach $0,3\ \%$ [22]. SM sa využíva pri prenosoch na väčšie vzdialenosti a typický je prenos na vlnových dĺžkach $1310\ \text{nm}$ a $1550\ \text{nm}$. Prenosové pásmo dosahuje stovky $\text{GHz}\cdot\text{km}^{-1}$, prenosová rýchlosť $\text{Tbit}\cdot\text{s}^{-1}$. Útlm sa pohybuje v medziach $1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ a $0,4\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ v závislosti od typu SM vlákna a od vonkajšieho alebo vnútorného použitia. V jadre SM vlákna nie je priestor pre šírenie vyšších módov, je vymedzená len jedna cesta, ktorou má byť svetlo šírené. Použitie SM vlákien vyžaduje väčší ohľad na čistotu spojov a taktiež sú náchylnejšie na ohyby (obr. 4).



Obr. 4: SM optické vlákno, skoková zmena indexu lomu. Profil SM vlákna.

Pre SM vlákno je dôležitým parametrom MFD (Mode Field Diameter), ktorý určuje priemer vyjadrujúci, že časť svetla sa šíri nielen jadrom vlákna ale aj v plášti vlákna. Predstavuje rozloženie módového poľa v jadre a zároveň v plášti vlákna a je vždy väčší ako priemer jadra. Presah do plášťa je možné vyjadriť exponenciálnym poklesom. Rozloženie intenzity energie vo vlákne je blízke Gaussovej krivke a MFD predstavuje pokles na istú šírky módovej intenzity. Tento pokles môže byť definovaný na hodnotu zvyčajne rovnú $1/e^2$ z maximálnej hodnoty I_{max} výkonu (v dominantnom móde LP_{01}) [3].

Platí vzťah:

$$I_{MFD} = \frac{1}{e^2} \cdot I_{max} = 0,135 \cdot I_{max} \quad (3)$$

Veľkosť MFD závisí na priemere vlákna, vlnovej dĺžke, indexe lomu jadra a plášťa. So skracujúcou sa vlnovou dĺžkou klesá i MFD a taktiež platí, že ohybové straty rastú s rastúcim MFD. Pri spojení dvoch SM vlákien s rovnakými priermi, geometrickým rozmerom ale s rôznymi hodnotami MFD dochádza nárastu útlmu.

2.4 Špecifikácie vlákien

Okrem spomenutej organizácie IEC sa štandardmi optických vlákien zaoberá aj medzinárodná organizácia ITU (International Telecommunication Union) a štandardy pre telekomunikačné riešenie ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) sa zaoberajú špecifikovaním

optických vlákien ako prenosových médií a ich charakteristikou. Jedná sa najmä o sériu štandardov pre optické vlákna v rozsahu G.651-G.657.

2.4.1 Typy a špecifikácie použitých vlákien

Pri tvorbe meracieho systému boli použité vlákna typu G.652.D. Pri použití systému pre meranie sa využilo taktiež vlákno typu G.655 ako vzorka optického vlákna.

Tabuľka 1: Parameter útlmu pre vlákno ITU-T G.652.D.

Štandard G.652.D		
Koeficient útlmu	Oblasť vlnovej dĺžky	Hodnota
	max. v 1310 nm až 1625 nm	0,4 dB·km ⁻¹
	max. v 1383 nm ± 3 nm vplyv OH	0,4 dB·km ⁻¹
	max. v 1530-1565 nm	0,3 dB·km ⁻¹

Vlákno G.652 je odporúčané použiť v oblasti vlnových dĺžok 1310 nm, 1550 nm. ITU-T G.652 charakterizuje SM optické vlákno a kábel s rozmermi 9/125 µm. Staršie varianty G.652.A a G.652.B nie sú optimalizované pre WDM (Wavelength Division Multiplex) pre ich vysoký útlm na vlnových dĺžkach 1360 nm - 1460 nm.

Varianty G.652.C a G.652.D charakterizuje zredukovaný ZWP (Zero Water Peak), ktorý umožňuje ich použitie v rozsahu vlnových oblasti medzi 1310 nm a 1550 nm a sú vhodné na CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) prenos. Zredukovaná koncentrácia OH iónov spôsobila zníženie útlmu v oblasti vlnovej dĺžky 1383 nm, a tým sa vytvoril priestor pre použitie väčšej šírky pásma vlnových dĺžok [15].

G.652.D je štandardné SM vlákno určené pre vysokorýchlostné prenosové systémy (vďaka zníženej disperzií polarizačného režimu - PMD, menší než 0.5 ps·km⁻¹). Útlm pre vlnovú dĺžku 1310 nm - 1625 nm dosahuje hodnôt do 0,4 dB·km⁻¹ a pre vlnovú dĺžku 1550 nm a 1383 nm 0,3 dB·km⁻¹ [6].

Štandard G.655 charakterizuje SM vlákno s posunutou nenulovou disperziou v oblasti vlnových dĺžok 1530 nm - 1565 nm, jedná sa o koeficient chromatickej disperzie [7]. Vlákno býva označené ako NZDSF (Non Zero Dispersion-Shifted Fiber). V porovnaní s vláknom typu G.652 má väčší rozmer jadra. Nenulová hodnota disperzie redukuje nárast nelineárnych javov vo vlákne, ktoré sa objavujú pri DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) ako nežiadúce (napr. FWM) [15]. Je vhodné pre prenos v oblasti 1550 nm a technológiu DWDM. V tabuľke 2 sú porovnané hodnoty pre štandardy vlákien použitých pri realizácii merania [16].

Tabuľka 2: Vlákna G.652.D a G.655 a ich parametre.

	ITU – T G.652.D	ITU – T G.655
Priemer vidového poľa		
pri 1310 nm	$9,2 \pm 0,4$ [μm]	-
pri 1550 nm	$10,4 \pm 0,5$ [μm]	$9,6 \pm 0,4$ [μm]
Tlmenie/ Útlm		
pri 1310 nm	$\leq 0,36$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]	-
pri 1383 nm	$\leq 0,31$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]	-
pri 1550 nm	$\leq 0,21$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]	$\leq 0,22$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]
pri 1610 nm	$\leq 0,23$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]	$\leq 0,24$ [$\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$]
Chromatická disperzia (D)		
pri 1285 – 1330 nm	$\leq 3,5$ [$\text{ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$]	-
pri 1550 nm	≤ 18 [$\text{ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$]	$2,80 \leq D \leq 6,20$ [$\text{ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$]
pri 1625 nm	≤ 22 [$\text{ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$]	$5,77 \leq D \leq 11,26$ [$\text{ps}\cdot(\text{nm}\cdot\text{km})^{-1}$]
PMD	$\leq 0,2$ [$\text{ps}\cdot(\sqrt{\text{km}})^{-1}$]	$\leq 0,1$ [$\text{ps}\cdot(\sqrt{\text{km}})^{-1}$]

3 Rozbor metód merania útlmu na optických trasách

Optické vlákno je médium slúžiace k prenosu informácie vo forme optického signálu na optických trasách. Optická trasa pozostáva z vysielача, prenosového prostredia a prijímača. Ak je prenosovým prostredím optické vlákno, dochádza k zmene optického signálu pri prenose, k zoslabeniu a k zmenám tvaru prenášaného impulzu aj časovej polohy. Útlm ako parameter spoja, znamená obmedzenie jeho dosahu. V závislosti na optických trasách je volená vhodná metóda na meranie prenosových charakteristík trasy.

3.1 Útlm optického vlákna

Pri optickej trase je útlm parameter vyjadrujúci straty optického výkonu. Medzi hlavné príčiny jeho vzniku patrí absorpcia prostredia, v ktorom sa žiarenie šíri, rozptyl na nehomogenitách, vyžarovanie z vlákna. Ďalšími príčinami strát môže byť porušenie dokonalej geometrie vlákna alebo hranice medzi jadrom a plášťom, taktiež sa môže jednať o mikroohyby alebo trhliny v materiáli vlákna. Náhla zmena teplotných podmienok môže spôsobiť navýšenie hodnôt útlmu, rovnako i iné podmienky prostredia. Hodnoty útlmu bývajú vyjadrené v $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$.

3.1.1 Absorpcia

Ako sa svetelné vlny šíria optickým vláknom dochádza k interakcii medzi fotónmi a atómami. Fotóny pokračujú v prenose energie cez atómy v štruktúre postupne. Tento proces vedie k absorpčnej strate, ktorá je závislá od vlnovej dĺžky prechádzajúceho svetla ako aj od materiálu. Maticová štruktúra materiálu a nečistoty majú významný vplyv na absorpciu.

Na základe rôznych podnetov, absorpčná strata je klasifikovaná na vlastnú absorpčnú stratu a nevlastnú absorpciu na nečistotách. Vlastná absorpcia je absorpciou, ku ktorej dochádza pri interakcii prechádzajúceho žiarenia so štruktúrou vlákna, atómami. Žiarenie o istej vlnovej dĺžke býva pohlcované (obr. 5). Absorpcia v infračervenej oblasti s rastúcou vlnovou dĺžkou stúpa, v ultrafialovej, s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá [25]. K nevlastnej absorpcii, extrinzičkej, dochádza pri interakcii žiarenia s nečistotami v štruktúre, napr. prítomnosť OH iónov alebo trhlín v štruktúre vlákna. Pri bežných vláknach sú OH ióny absorpčnými centrami. Nachádzajú sa v oblastiach vlnových dĺžok 950 nm, 1244 nm a 1383 nm [19]. Okrem OH iónov sa jedná o kovové nečistoty, prvky (Cr, Cu, Fe, V, Ni, Mn) [26].

3.1.2 Rozptyl

Rozptyl vzniká pri kolízii fotónov s komplexom atómov. Mikroskopické zmeny v materiálovej hustote vlákna a nedokonalosti v štruktúre vznikajúce už počas výrobného procesu vedú k rozptylovým stratám. Žiarenie neprechádza pôvodným a požadovaným smerom šírenia v prostredí. Rozlišuje sa lineárny (Rayglieho, Mieov) a nelineárny (Ramonov, Brillouinov) rozptyl. Lineárny rozptyl vzniká na nehomogenitách. Pre šírenie žiarenia je požadovaná homogenita materiálu. K

narušeníu tejto vlastnosti dochádza zmenami v dokonalosti štruktúry, vznikom napr. zrazenín alebo náhlou zmenou indexu lomu v rôznych miestach materiálu. Nelineárny rozptyl závisí od hustoty optického výkonu a spôsobuje zmenu pôvodnej vlnovej dĺžky šírenej vláknom.

Vo vlákne dochádza k Rayglieho rozptylu, ktorého vznik je nevyhnutný a je minimálnym limitom optickej straty. Vzniká v dôsledku už spomenutých nehomogenít v materiáli optického vlákna v podobe fluktuácií indexu lomu, ktorých veľkosť je menšia ako vlnová dĺžka prechádzajúceho žiarenia. Nehomogenity sú dané materiálom a výrobným procesom. Hodnota tlmenia spôsobená Rayglieho rozptylom je nepriamo úmerná štvrtjej mocnine vlnovej dĺžky, preto sa pre zníženie vplyvu rozptylu používa čo najvyššia pracovná vlnová dĺžka pre šírenie optickým vláknom. Rayglieho rozptyl sa vyznačuje všesmerovosťou [28]. Vplyv Rayliegho rozptylu je možné vyjadriť zo vzťahu:

$$P_{out} = P_{in}e^{-\gamma_R L} \quad (4)$$

P_{out} je optický výkon na výstupe vlákna o dĺžke L , P_{in} je výkon na vstupe vlákna a γ_R je Rayliegho rozptylový koeficient, ktorý je možné vyjadriť ako:

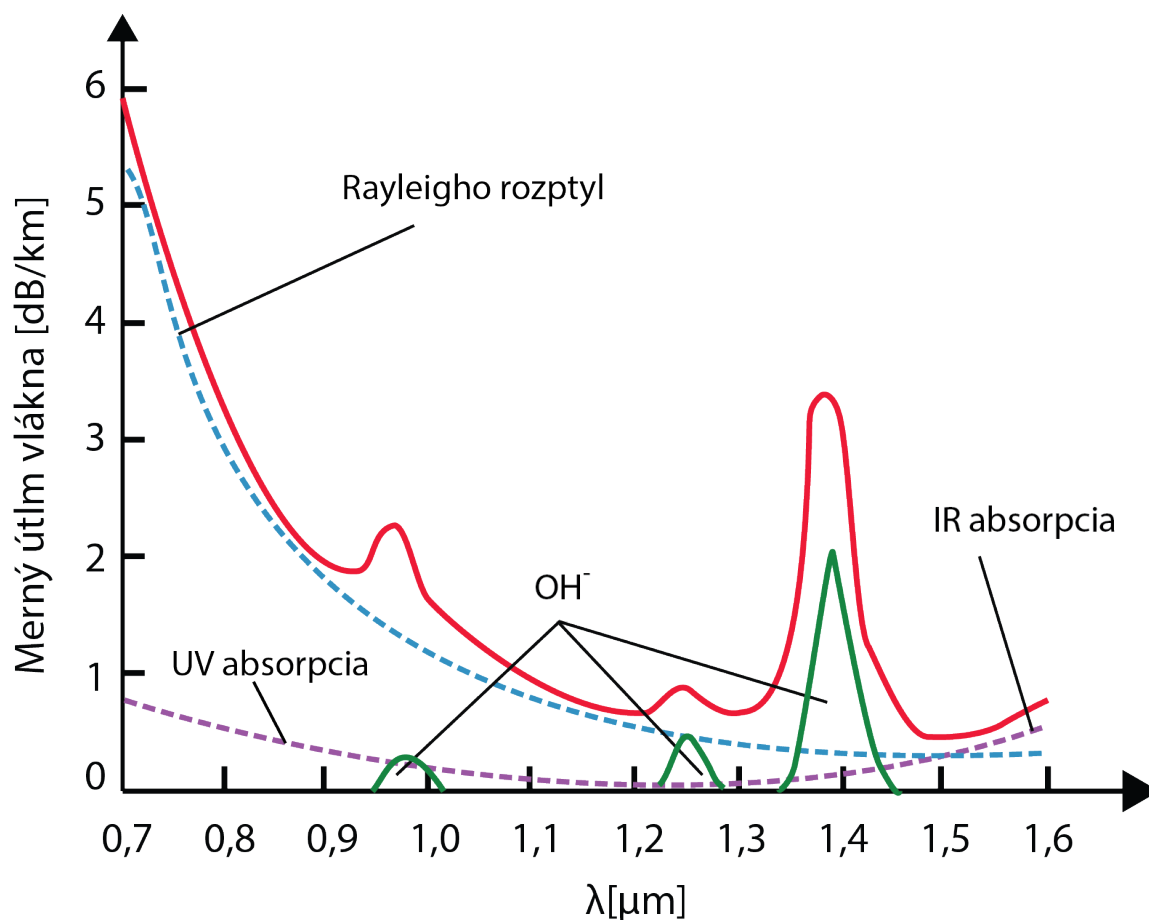
$$\gamma_R \sim K \cdot \frac{n^8}{\lambda^4} T \quad (5)$$

K je konštanta úmernosti, n je index lomu jadra, λ vlnová dĺžka žiarenia a T je teplota [27].

Mievov rozptyl vzniká na nehomogenitách, nedokonalostiach vláknovej geometrii a taktiež na nerovnomernosti indexu lomu. Je možné ho eliminovať počas výrobného procesu. K Mieovmu rozptylu dochádza na časticách vo veľkosti porovnateľnej s vlnovou dĺžkou prechádzajúceho žiarenia a väčších nehomogenitách. Oproti Rayglieho rozptylu má rozptyl smerový charakter a to najmä v doprednom smere.

Brillouinov rozptyl je vyvolaný deformáciou vlákna alebo aj pozdĺžnou akustickou vlnou. Maximum energie je rozptýlené v spätnom smere. Vplyvom rozptylu je fotón o nižšej energii šírený opačným smerom a o rozdielnej frekvencii. Vzniká taktiež akustická vlna, ktorá dokáže lokálne zmeniť index lomu.

Pri Ramonovom rozptyle sa jedná o vzájomnú interakciu fotónov šíriacich sa v danom prostredí s týmto prostredím, čoho dôsledkom je posun vlnovej dĺžky optického signálu, zmena energie, frekvencie fotónu. Rozptýlená svetelná vlna sa šíri oboma smermi [12].



Obr. 5: Straty vo vlákne [31].

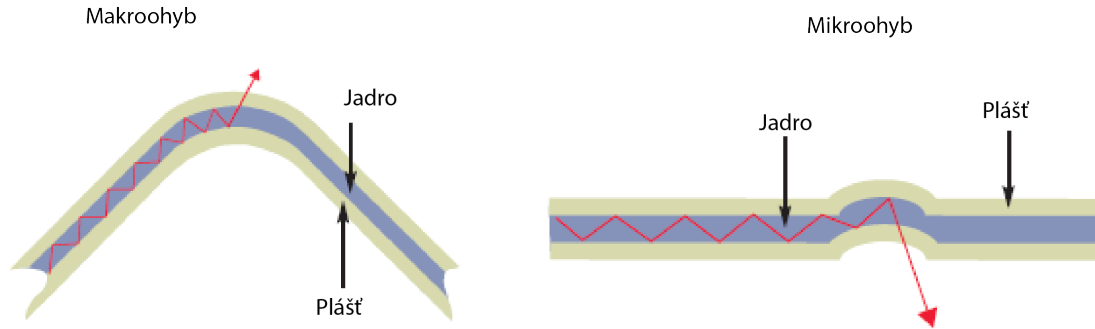
3.1.3 Ohybové straty

Ohýbanie vlákna nad určitý rozsah vedie k ohybovým stratám. Dochádza k zmene uhlu odrazu pri dopade žiarenia na rozhranie jadra a plášťa a žiarenie býva pohltené v plášti (obr. 6).

Mikroohyb vlákna je porucha spôsobená pôsobením priečnych síl na kábel, nemusí byť navonok viditeľná. Pozdĺžna os vlákna nie je priamočiara, ale je zvlnená. Pre predstavu býva odchýlka skutočnej osi od ideálnej asi $1 \mu\text{m}$ a perióda zvlnenia osi je v jednotkách mm až cm. Priečne sily pôsobiace pozdĺž kábla môžu vzniknúť pri výrobe, montáži, pnutí, teplotnými výkyvmi. Náchylnosť k mikroohybu je závislá taktiež na rozdieli indexu lomu jadra a plášťa a na ich priemeroch. Odstránením mikroohybu sa hodnoty vrátia k pôvodným. MM vlákna, pri ktorých je energia šíreného svetla rozložená do viacerých módov je dopad mikroohybov nižší ako pri SM, a to z dôvodu, že väčšina energie je šírená vyššími módmi a mikroohyb zasiahne prevažne módy nižšieho rádu. Pri meraní sa jedná o periodické výkyvy na útlmovej krivke.

Makroohyby vznikajú pri inštalácii vlákien, a to zakrivením vlákna, závisia od polomeru ohybu vlákna.

Helmholtzove rovnice pre zakrivenie vlákna popisujú kritický polomer pre zakrivenie optického vlákna [23]. Podľa miery zakrivenia vo vlákne môže dôjsť k vzniku stojatej vlny, kedy sa elektromagnetické pole stáva oscilujúcim alebo k vzniku evanescentnej vlny. Predchádza sa mu správnou inštaláciou, testovaním, nepresiahnutím stanovených hodnôt pre dlhodobý uhol ohybu vlákna.



Obr. 6: Pôsobenie ohybu [32].

3.2 Metódy merania útlmu optického vlákna

Pre meranie útlmu optických vlákien sa používajú viaceré metódy. Všetky uvádzané metódy pracujú s hodnotou optického výkonu. Rozlišuje sa medzi priamou transmisnou metódou merania, kedy sa jedná o meranie útlmu optického vlákna za pomoci meracích prístrojov na oboch koncoch meranej trasy. Sú to zdroj optického žiarenia a detektor, ktorého funkciou je meranie optického výkonu na výstupe trasy. Ďalšou možnosťou je nepriame meranie útlmu metódou spätného rozptylu. Hodnota útlmu je mierou straty optického výkonu pri šírení optického signálu vláknom. Jeho hodnota je určená zo vzťahu, v závislosti na vlnovej dĺžke:

$$a[dB] = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (6)$$

Jedná sa o vyjadrenie podielu optických výkonov na vstupe P_1 a výstupe P_2 optického vlákna. V logaritmickú stupnicu, v jednotkách dB sa jedná o stratu optického výkonu.

Merný útlm vlákna sa vzťahuje na jednotku dĺžky vlákna l a je vyjadrený ako:

$$A[dB \cdot km^{-1}] = \frac{10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{l} \quad (7)$$

Vložný útlm IL (Insertion Loss) je frekvenčne závislá veličina, v optických trasách je to vlnová dĺžka, ktorá má špecifický útlm. Je definovaný ako strata optickej energie pri prechode optického žiarenia optickým prvkom. Predstavuje súčet vložných útlmov všetkých prvkov, konektorov, optických vlákien začlenených do trasy, rovnako ako i prítomnosť ohybov, poškodení na trase. Meria sa pre každú vlnovú dĺžku, ktorá je v trase použitá obojsmerne pri obojsmernej komunikácii.

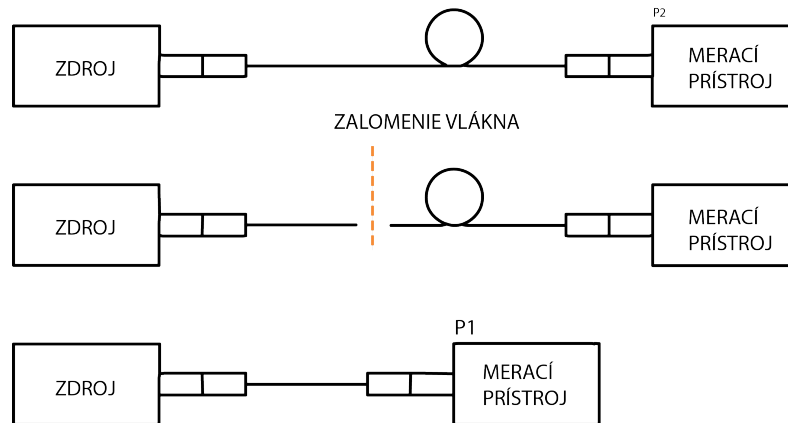
Pri zohľadnení parametru MFD ako funkcie vlnovej dĺžky, dochádza k nárastu ohybových strát s rastom oboch týchto prenosových parametrov vlákna. Nárast útlmu sa prejavuje pri spojení vlákien s rôznymi veľkosťami MFD, platí vzťah:

$$A[\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}] = -20 \log\left(\frac{2 \cdot \text{MFD}_1 \cdot \text{MFD}_2}{\text{MFD}_1^2 + \text{MFD}_2^2}\right) \quad (8)$$

Vložný útlm nie je zanedbateľný pri spojení vlákna s väčším MFD k vláknu s menším parametrom MFD.

3.2.1 Metóda dvoch dĺžok (Cut-Back Method)

Je odporúčaná ako referenčná metóda pre meranie útlmu optického vlákna. Je zároveň deštruktívnou metódou. Pri použití tejto metódy sa v prvom kroku navedie optické žiarenie do optického vlákna a zmeria sa výkon P_2 na jeho konci (obr. 7). Následne sa merané vlákno zlomí vo vzdialenosti cca 2 m od vstupu do vlákna (spojenie medzi zdrojom žiarenia a vláknom nesmie byť porušené), očistí sa jeho koniec, na ktorom sa zmeria výkon P_1 . P_1 je výkon na vstupe optického vlákna [14].



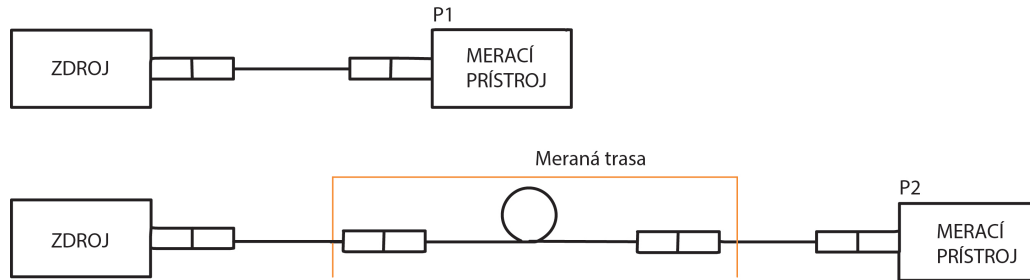
Obr. 7: Metóda dvoch dĺžok.

3.2.2 Metóda vložných strát (Insertion-Loss Method)

Metóda vložných strát je dvojstupňová a nie je deštruktívna. V prvom kroku sa za zdroj žiarenia pripojí referenčné vlákno o dĺžke cca 2 m, za ním sa zmeria výkon P_1 , ktorý predstavuje vstupný výkon (obr. 8). Jedná sa o kalibráciu meracej sústavy. V druhom kroku sa za referenčné vlákno pripojí merané vlákno a na jeho konci sa zmeria výkon P_2 . Táto metóda nie je rovnako presná ako metóda dvoch dĺžok, okrem útlmu meraného vlákna sa pridáva i útlm vznikajúci na spoji oboch vlákien. Vlákná referenčné a vlákno merané by si mali byť parametricky čo najpodobnejšie, aby sa eliminovali straty vznikajúce na väzbe referenčného a meraného vlákna.

Na spresnenie výsledku sa v praxi uskutočňuje meranie trasy z oboch smerov a výsledné hodnoty sa spriemerujú. Týmto sa eliminuje vplyv rozdielnej distribúcie optického zväzku. Me-

tóda sa využíva najmä pre MM vlákna. Ďalej je možné použiť tri varianty tejto metódy: 1a, 1b, 1c podľa normy ISO/IEC 14763-3 [33]. Metóda 1a využíva jeden patchcord - krátke referenčné optické vlákno odporúčanej dĺžky 2 m - metóda 1b zavádza dva patchcords a metóda 1c používa tri patchcords pre referenciu. Postup pri všetkých metódach spočíva v zapojení meraného vlákna za referenčné vlákno - patchcord. Pri zvolení metódy je dôležité rátať so stratou na konektoroch pri vložení meraného vlákna v prípade, že neboli súčasťou referenčného merania [11].



Obr. 8: Metóda vložných strát, varianta 1a.

3.2.3 Metóda spätného rozptylu (Back-scattering Method)

Metóda spätného rozptylu je metódou optickej reflektometrie v časovej oblasti (Optical Time Domain Reflectometry), skrátene OTDR. Metóda spätného rozptylu vychádza z princípu odrazu časti optického výkonu počas šírenia pulzu optickým vláknom. Šírený pulz je určený výkonovou hodnotou P a svojou šírkou λ .

Vzdialenosť l , ktorá určuje rozdiel medzi časom vyslania pulzu a jeho opätovným prijatím je daná vzťahom:

$$l[m] = -\frac{c \cdot t}{2n} \quad (9)$$

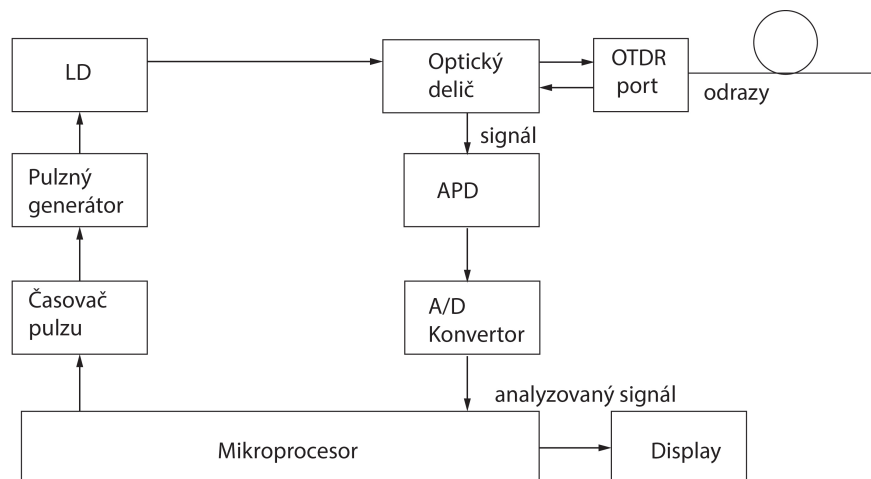
Vo vzťahu je c rýchlosť svetla vo vákuu, t čas od vyslania k prijatiu pulzu a n je efektívny index lomu, špecifikovaný výrobcom. Spätný výkon P_b , ktorý je odrazený vo vzdialenosť l je určený ako:

$$P_b(l) = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \Delta t \cdot S \cdot \gamma_R \cdot v_g e^{-2\gamma l} \quad (10)$$

P je vstupný výkon, v_g je skupinová rýchlosť šírenia signálu Δt je šírka optického pulzu, γ_R je Rayleighov rozptylový koeficient, γ je stredná hodnota koeficientu útlmu vlákna na dĺžke l v oboch smeroch, S je koeficient spätného rozptylu, určujúci aká pomerná časť optického výkonu sa po rozptyle šíri späť [2].

Pri prechode svetla vláknom dochádza k dvom druhom odrazu. Jedná sa o Rayleighov rozptyl, pri ktorom sa časť tohoto rozptylu šíri späť vo vlákne, dochádza k nim na mikroskopických fluktuáciách indexu lomu skla. Množstvo spätne rozptýleného svetla je priamo úmerné prichádzajúcemu optickému výkonu. V druhom prípade sa jedná o Fresnelove odrazy, ku kto-

rým dochádza pri dopade svetla na rozhranie dvoch prostredí, teda na nespojitosti indexu lomu. Pomocou týchto odrazov je možné určiť útlm na konektoroch, zvaroch alebo prerušeníach optického vlákna. Vyhodnocuje sa časová závislosť späťne rozptýleného optického výkonu pri šírení impulzu vo vlákne.

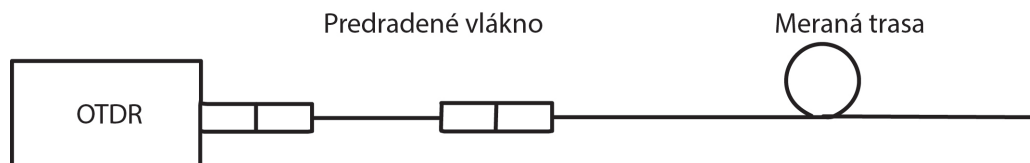


Obr. 9: Reflektometer a spracovanie signálu.

Reflektometer ako prístroj pozostáva z optického zdroja LD, pulzného generátora, optického spojovacieho člena, A/D prevodníka, riadiacej jednotky (obr. 9). Počas merania je prevádzaný signál na vzorky. Ako detektor slúži APD, lavínová fotodióda. Detekované vzorky sú prevedené na body zobrazené v presnej vzdialenosti meranej trasy. Riadiaca jednotka riadi vysielanie svetelných pulzov, spracováva a vyhodnocuje vzorky. Výsledkom je zobrazenie trasy na obrazovke reflektometra [2].

Optický reflektometer umožňuje získať nielen informácie o útlme, ale i o celkovej kvalite v celej dĺžke vlákna. Umožňuje kontrolu spojov na optických trasách, diagnostiku optických vlákien ako je lokalizácia porúch, fluktuácií parametrov vlákna. Z časového oneskorenia odrazu od zadného konca vlákna voči odrazu od vstupného konca vlákna je možné určiť jeho dĺžku. Analýzou späťne rozptýleného svetla je možné získať prehľad o homogenite vlákna. Metóda je nedeštruktívna a ďalšou výhodou je možnosť uskutočniť meranie z jedného konca vlákna.

Meraná trasa sa pripája k OTDR meraciemu prístroju priamo alebo za predradené vlákno (obr. 10). Predradené vlákno má za účel predchádzať vplyvu počiatočného odrazu na vstupnom konektore meracieho prístroja. Jeho význam je i v zabránení poškodenia vstupného konektoru OTDR. Pri meraní krátkych vzdialeností je využívané i zaradné vlákno. Všetky vlákna v zapojení by mali byť rovnakého typu.



Obr. 10: Metóda spätného rozptylu.

Pri meraní pomocou OTDR je možné sledovať celkový charakter trasy. Na monitore reflektometra je znázornená krivka spätného rozptylu. Pri ideálnej krivke je možné vidieť a očakávať odraz, počiatkový Fresnelov odraz a odraz na konci vlákna, po prejdení pulzu celou dĺžkou trasy, nasledovaný výrazným poklesom, šumom. Na trase sa môžu objavovať nehomogenity - prítomné konektory alebo zvary s výrazným poklesom na krivke. Ďalšie zaznamenané odchýlky od očakávaného priebehu krivky môžu byť spôsobené ohybmi alebo nečistotami vnesenými do vlákna trasy, v kontraste s vláknom ako homogénnym prvkom. Metódou je možné určiť celkový útlm trasy, útlm na úseku pripojeného vlákna, útlm vnesený konektormi, zvarmi a lokalizácia poruchy. Meranie vlákna pomocou reflektometra a metódou spätného odrazu pracuje s nasledovnými parametrami. Jedná sa o zvolenie vlnovej dĺžky, voľbu dĺžky trasy, dĺžky pulzu vedeného vláknom a časový interval merania. Je dôležité zohľadniť šírku optického pulzu pre získanie potrebnej citlivosti fotodetekcie a zároveň získať námer v celej dĺžke trasy [11].

4 Starnutie optických vlákien a vplyv radiačného žiarenia

4.1 Starnutie optických vlákien

Starnutie optických vlákien je prirodzený jav, podmienený materiálom a užívaním vlákien a prvkov optickej siete v danom prostredí. Pri inštalácii prenosového systému by mali byť zabezpečené adekvátne podmienky, aby sa predchádzalo mechanickým poškodeniam, oslabeniu ochranných vrstiev vlákien, a tým nedochádzalo k nárastu útlmu. Správna inštalácia, vhodné prostredie a ochranný izolačný materiál zabezpečujú vlákna a starnutie je prirodzeným procesom.

V neštandardných podmienkach, akými sú napríklad zmeny teploty, vlhkosti, prítomnosť radiaácie a vplyv chemikálií môže dochádzať k urýchlenu starnutiu prvkov optickej siete, optických vlákien.

Pre optické vlákna platí, z hľadiska špecifických výhod média, že sú imúnne voči rádiovým interferenciám a elektromagnetickej interferencii. Pod vplyvom extrémnych podmienok môže dochádzať k zmenám v samotnej podstate materiálu, skráteniu ich životnosti a môžu byť stratené nielen výhody ponúkané týmto médiom ale aj štandardné požiadavky naň kladené.

Medzi ďalšie faktory vedúce k urýchlenu starnutiu patria: nárast zaťaženia - vysoký optický výkon, zvyšovanie počtu prenosových kanálov vo vlákne alebo aj kompresné vplyvy - ťah, tlak, vibrácie [22].

Viditeľné prejavy starnutia sú mikrotrhliny ako aj krehkosť vlákien, pričom dochádza k ich lámaniu a k strate pevnosti. Nastáva zmena vlastností materiálu, ako aj zmena parametrov ovplyvňujúca prenosové médium. Materiál optického vlákna je chránený ochrannou štruktúrou - polymérmi, ktorých starnutie sa prejavuje v stálom, stabilnom prostredí pomaly. Starnutie urýchľuje teplota, nárast ako aj jej kolísanie, chemické pôsobenie, ionizujúce žiarenie, mechanické namáhanie [21].

Teplota vplýva najmä na gély v ochrannej vrstve kábla. Pôsobenie vysokej teploty na optické prvky vyvoláva aj zmeny v geometrii lúča a tvare šírenej energie. Dochádza k rozloženiu energie šírenia na centrálnej vlnovej dĺžke do takej miery, že sa stráca jej definované maximum výkonu a energia je rozložená v plášti, prenášaný lúč je rozprestretý do väčšej oblasti [20].

Vplyv vlhkosti a OH iónov je významný už počas výrobného procesu, kedy je snahou eliminovať i prítomnosť OH iónov (OH ión interaguje s väzbou SiO_2). Ich prítomnosť v materiáli vedie ku krehnutiu vlákna, náchylnosti k prasknutiu. Vonkajší vplyv na polyméry vedie k ich tvrdnutiu.

Ionizujúce žiarenie kvôli svojej prenikavosti vyvoláva zmenu absorpčných charakteristík. Jeho vplyv sa prejavuje navonok zafarbením vlákna a zvýšením hodnôt útlmu, vedie až k slepnutiu optických vlákien. Pre materiál vlákna sú určujúce dopanty, kedy germárium ako prímes zvyšuje fotocitlivosť, fluór ju naopak znižuje. Po ukončení ionizačného vplyvu na vlákno nastáva relaxácia materiálu vlákna a útlm je postupne znižovaný. Počiatočné hodnoty útlmu však nie sú dosiahnuté.

Mechanické namáhanie pôsobí na kábel celkovo, na ochranné vrstvy i na prenos, kedy sa jedná o narušenie základného princípu šírenia vo vlákne. Jedná sa o všeobecne o straty vznikajúce pri manipulácii, ohybové straty, ktoré ak sú sprevádzané už spomínanými vplyvmi vedúcimi k urýchlenému starnutiu len urýchľujú proces.

Starnutie ako proces ovplyvňujú aj bežné zmeny prostredia, ako prítomnosť organizmov, žiarenia, živly alebo prírodné prejavy. Dôležitá je údržba a stabilita prostredia, použité materiály a ich výmena [21].

4.2 Radiačné žiarenie

Rádioaktivita je jav, kedy sa jadrá atómov určitého prvku samovoľne premieňajú na jadrá iného prvku. Dochádza k transmutácii prvku a zároveň k emitovaniu žiarenia [25]. Podľa druhu emitovaného žiarenia sa klasifikuje rádioaktivita na: α, β, γ .

Pri rádioaktívnej premene vyletí z jadra veľkou rýchlosťou častica - kvantum žiarenia. Podľa zákona akcie a reakcie tým bude jadro (celý atóm) odstránený opačným smerom, bude mať kinetickú energiu pohybu. Podobne pri absorpcii žiarenia je látke predávaná energia na úrovni kinetickej energie atómu, rádioaktívna látka sa zahrieva. Preto platí, že teplo je sprievodným javom pre všetky druhy rádioaktivity.

Elektromagnetická energia s frekvenciou f vystupuje taktiež ako svetelné kvantum, fotón, ktoré má svoju energiu E a hybnosť p (jednotka hybnosti je $kg \cdot m \cdot s^{-1}$). Zo vzťahu vyplýva, že s nárastom f rastie i energia E : (Planckova konštanta $h = 6,6251 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, rýchlosť svetla vo vákuu $c = 299\,792\,458 \text{ km} \cdot s^{-1}$).

$$E = h \cdot f \quad (11)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (12)$$

Vznikajúce radiačné žiarenie má rôzny charakter. Kým pri alfa žiarení sa jedná o jadrá hélia, ktoré sú kladne nabité, vychylujúce sa v elektrickom a v magnetickom poli, beta žiarenie sú častice - elektróny alebo pozitrony vyžiarené z jadra atómu ovplyvňované elektrickým poľom.

Pri gama žiarení sa jedná o prúd vysoko energetických fotónov. Pokiaľ sa jedná o žiarenie fotónové je možné hovoriť o gama žiarení a röntgenovom žiarení. Fotónového žiarenia sa rádovo pohybuje v jednotkách MeV nezávisle na jeho vzniku. O vysoko energetickom žiarení je možné hovoriť ako o ionizujúcom, pôsobiacom na ožiarenú látku. Jedná sa buď o ionizovanie atómov látky alebo exitovanie atómových jadier.

Pokiaľ je žiarenie šírené v látkovom prostredí jeho časť prechádza pôvodným smerom, môže byť však aj rozptýlené a absorbované. Preto je medzi druhmi žiarenia možné rozlišovať žiarenie málo prenikavé alfa alebo beta a žiarenie prenikavé X žiarenie, gama, neutrónové, mionové, neutrínové [26].

Energetické účinky žiarenia, teda kvantá energie nesené žiarením umožňujú rozlíšiť žiarenie na mäkké s nízkou energiou, menšou ako 5 keV, ktorá nie je schopná vyrážať elektróny z atómových obalov a má predovšetkým mechanické a tepelné účinky. Menej bežné sú elektrické účinky ako vonkajší a vnútorný fotoefekt, zmeny elektrickej vodivosti alebo účinky fotochemické. Druhým typom je žiarenie tvrdé, s energiou v desiatkach keV a väčšou, kedy už dochádza k spomínanej ionizácii látky [26].

4.2.1 Gama žiarenie

Gama žiarenie je druhom vysoko energetického elektromagnetického žiarenia, energia fotónov je nad 10 keV, vznikajúce deexcitáciou vybudených hladín atómového jadra. Okrem deexcitácie vzbudených hladín v atómových jadrách môže gama žiarenie vznikať i pri anihiláciách pozitronov s elektrónmi a iných častíc a antičastíc. Taktiež vzniká pri interakciách vysoko energetických častíc (energia v radoch GeV, TeV a viac) [26].

V spektre elektromagnetického žiarenia sa jedná o prenikavé žiarenie s veľmi krátkou vlnovou dĺžkou (10^{-3} nm). Pri gama žiarení, teda výške frekvencie rádovo $f = 10^{18}$ Hz, vlna v klasickom zmysle zmizne a žiarenie sa vyžaruje vo forme kvánt, v krátkych dávkach, medzi ktorými sú relatívne dlhé nepravidelné medzery [25]. Vyžiarené kvantá môžu mať buď rovnaké energie alebo viacero rôznych energií, čo je spojené s množstvom existujúcich hladín v jadre látky, v ktorej dochádza k rozpadu.

Vo vzťahu k X-žiareniu, dosahuje energeticky vyššie hodnoty. Pri vyžiarení gama žiarenia z existujúceho jadra atómu môže prísť ku konverzii žiarenia, teda ku stretu žiarenia s elektrónom v obale atómu a preneseniu energie vrátane väzbovej energie elektrónu v obale, ich rozdielu. Dochádza k vyžiareniu kvanta X-žiarenia namiesto pôvodného kvanta energie gama žiarenia. Žiarenie gama je preto charakteristické čiarovým spektrom, častice sú emitované v určitých diskretných energiách, rovnako to platí i pre charakteristické X-žiarenie pri procese jeho vnútornej konverzie.

4.2.2 Vplyv radiačných dávok na materiál

Pri ožarovaní dochádza k interakcii žiarenia s ožarovanou hmotou. Absorpcia žiarenia v hmote je vyjadrená dávkou, definuje množstvo absorbovanej energie v J na jednotky hmoty v kg [1].

Dávka žiarenia je zároveň i dozimetrická veličina. Dozimetria ionizujúceho žiarenia sa zaoberá účinkami žiarenia na látku vo vzťahu k druhom žiarenia a vlastnosti interakcie žiarenia s látkou a k množstvu pohltenej žiarenia látkou, dávkou žiarenia [26]. Absorbovaná dávka D je energia ionizujúceho žiarenia absorbovaná v danom mieste ožiarenej látky na jednotku hmotnosti, je daná pomerom:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (13)$$

kde ΔE je stredná energia ionizujúceho žiarenia absorbovaná v objemovom elemente látky a Δm je hmotnosť tohto objemového elementu [26]. Miera absorbovania žiarenia látkou sa vyjadruje v jednotkách Gray ($\text{Gy} = 1 \text{ J} \cdot 1 \text{ kg}^{-1}$) a predstavuje množstvo energie, ktoré bolo absorbované materiálom o hmotnosti 1 kg. Absorbovaná dávka je miera energie určená ožiarenému materiálu bez ohľadu na zloženie a tvar poľa žiarenia [21]. Prevodný vzťah medzi elektronvoltom a joule je ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Dopad radiácie na materiál kvôli náhodnému toku fotónov je rôzny, závisí od materiálu, cez ktorý je fotón vedený a fotónovej energii radiácie, poľa vznikajúceho v okolí žiaríča. Prechod žiarenia je možné kategorizovať na prechod bez interakcie, kedy žiarenie len voľne prechádza látkou. V ďalších prípadoch prechodu ionizujúceho žiarenia dochádza k interakciám kvánt žiarenia so zložkami atómov. Jedná sa o interakcie silné, slabé a elektromagnetické interakcie [26]. Práve elektromagnetické interakcie sú najčastejšími procesmi pri prechode väčšiny žiarení látkou.

Rozsah poškodenia je od ľahkého zohriatia, kedy fotóny sú absorbované až po ionizáciu. Vtedy môže dôjsť k fotónovo-nukleárnemu rozbitiu, pokiaľ je energia počas fotónovej interakcie v jednotkách MeV alebo väčšia.

Podľa rôznej hodnoty fotónovej energie vplyv gama žiarenia na materiál zahŕňa: fotoefekt, vznik rozptylu, Comptonov jav, tvorbu elektrónovo-pozitrónových párov. Medzi ďalšie prejavy pri vystavení optického vlákna radiácii patria fluorescencia a Cerenkov jav.

Fotoefekt znamená, že žiarenie gama narazí na elektrón v atómovom obale, predá mu svoju energiu a zanikne. Je to absorpčný jav, pri ktorom sa elektrón uvoľní z obalu atómu a získa kinetickú energiu danú rozdielom energie žiarenia a väzbovej energie elektrónu v atóme.

Rozptyl vzniká pri interakcii častíc a v podstate dochádza k zmene pohybu častíc. Je možné rozlíšiť pružný rozptyl, kedy sa kinetická energia nemení v iný druh energie, pri nízko energetických stretoch. Častice sa pohybujú odlišným smerom s nižšou energiou a hybnosťou, pretože časť energie bola predaná telesu. Druhým typom je rozptyl nepružný, pri ktorom sa kinetická energia častice mení na iný druh energie pri procesoch ako je emisia kvanta žiarenia, excitácii, de-exitácii. Je sprevádzaný excitáciou alebo ionizáciou atómov, v niektorých prípadoch i jadrovými reakciami.

Gama žiarenie pôsobením na vlákno vedie k vysokej energii elektrónov, vyvoláva Comptonov jav, ktorý je zároveň primárnym dôsledkom poškodenia spôsobeným absorpciou gama žiarenia v optickom vlákne. Comptonov jav je pružný rozptyl fotónov. Pri zrážke fotónov a voľných elektrónov v látke dochádza k rozptylu, pričom vlnová dĺžka rozptýleného žiarenia je väčšia ako vlnová dĺžka dopadajúceho žiarenia, má nižšiu energiu.

Pre odrazené žiarenie platí, podľa zákona zachovania energie:

$$h \cdot f = h \cdot f' + E_k \quad (14)$$

E_k predstavuje kinetickú energiu elektrónu po zrážke a rozptýlené žiarenie má frekvenciu f^r nižšiu ako f dopadajúceho žiarenia.

Tvorba elektrónovo-pozitrónových párov je spôsobená v dôsledku stretu fotónov žiarenia gama o dostatočnej energii, kedy sa fotón gama premieňa na dvojicu častíc elektrón a pozitron. V látke následne ostáva len elektrón a pozitron anihiluje s ďalším elektrónom za vzniku gama žiarenia o energii 511 keV [26].

4.3 Radiačné žiarenie a jeho vplyv na optické vlákna

Predmetom skúmania je vplyv prostredia, v ktorom dochádza k vystaveniu optických komponentov radiačnému žiareniu. Radiačné žiarenie typu gama má vplyv na vnútornú štruktúru optického vlákna ako aj na materiálovú štruktúru ochranných vrstiev.

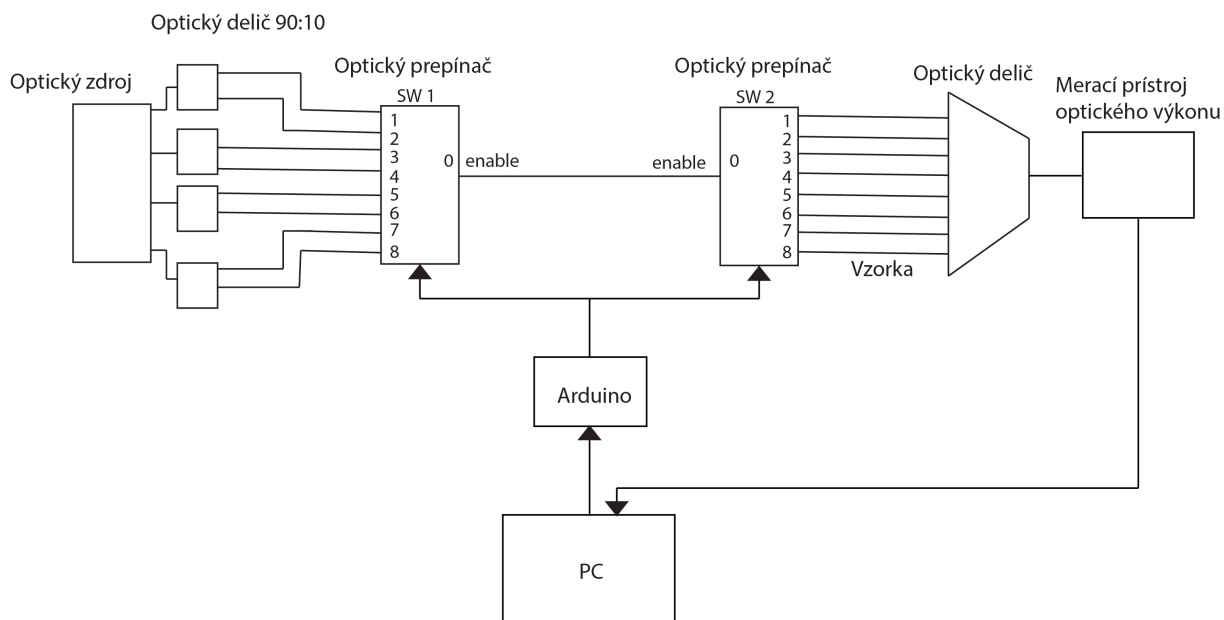
Vlastné merania, ktoré sú uskutočnené sa sústreďia na parameter výstupného výkonu. Dlhodobé meranie umožňuje zachytiť vplyv na vnútornú štruktúru vlákna, objavujúci sa ako zmeny v prenosových vlastnostiach, a tým v hodnote výkonu na výstupe. Výsledkom môže byť predikcia o čase, v ktorom nastávajú tieto zmeny, a tým presné určenie celkového vplyvu tohto typu radiácie na optické vlákno.

Radiácia ako žiarenie s vysoko energetickými časticami spôsobuje ionizáciu a atómové posuny v molekulovej stavbe SiO_2 [9]. Vlákno s jadrom z čistého SiO_2 má istú odolnosť voči radiačnému žiareniu. Z chemického hľadiska je dôležité, že pevná väzba SiO_2 skla je jednoduchšia ako skla s prímiesami. Dôležité je aj zohľadniť použitú technológiu pre výrobu optického vlákna.

V prípade vlákien dochádza vplyvom žiarenia k dejom, z ktorých sú dôležité najmä dej sieťovania a opačný jav rozštiepenia polymérnych reťazcov na krátke úseky. S rastúcou dávkou žiarenia a za prítomnosti vzdušného kyslíka začne prevládať dej štiepenia, čo sa prejaví ako krehnutie materiálu [1].

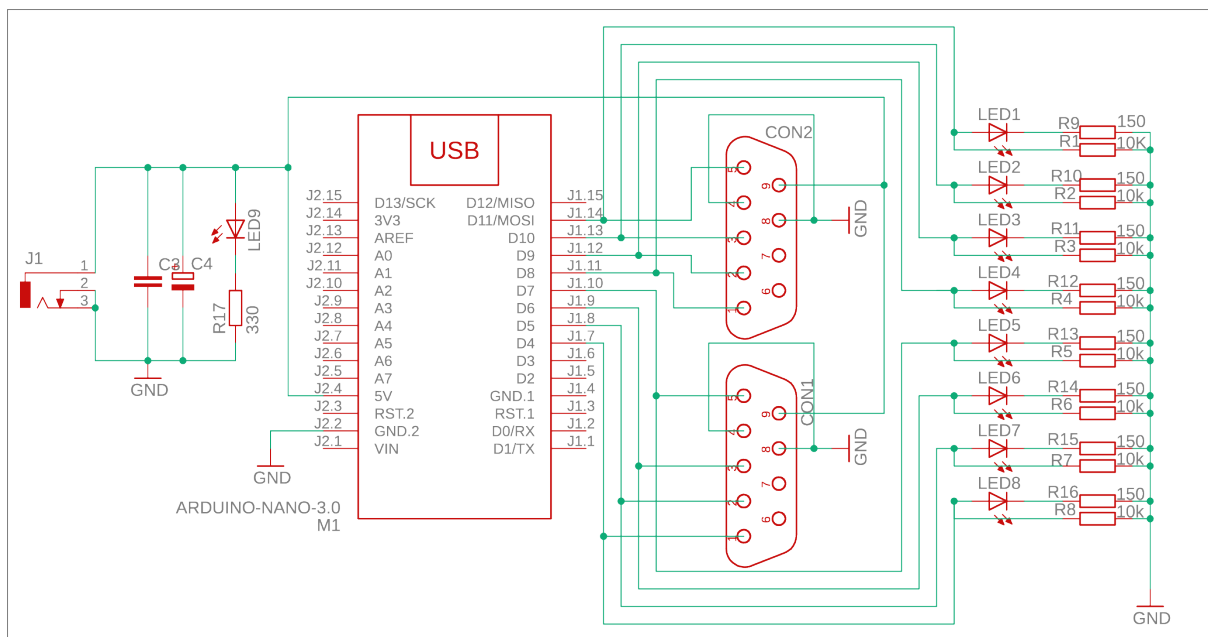
5 Návrh meracieho systému a aplikácie

Návrhu aplikácie predchádzala myšlienka zhotoviť systém pre automatizované meranie výkonu priamou metódou na viacerých pripojených vláknach, a to bez nutnosti zásahu do zapojenia jednotlivých trás. Na obrázku 11 je schéma systému v základnej podobe. Vytvorenie automatizovaného systému merania redukuje možnú chybovosť počas obsluhy meracieho prístroja. Dalo by sa povedať, že meranie získava na presnosti použitím automatizovaného systému, pokiaľ sú zohľadnené všetky parametre nevyhnutné pre jeho automatizáciu. Pri priamej metóde sa pre určenie vstupného výkonu používa referenčné vlákno a následne sa trasa doplní o zapojenie meraného vlákna. Pri vytvorenom meracom systéme je metóda modifikovaná a referenčné vlákno je možné pripojiť súbežne s meraným a vstupnú hodnotu výkonu získať nastavením parametrov aplikácie.

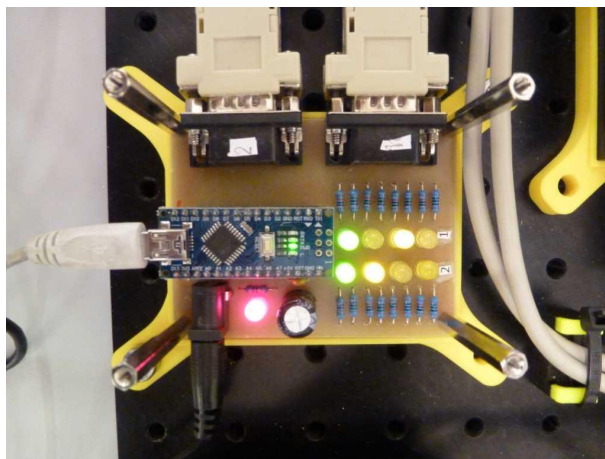


Obr. 11: Návrh meracieho systému.

Riadiacu časť meracieho systému predstavuje mikrokontrolér (Arduino s DPS) spolu s aplikáciou spustenou na PC. Cieľom je konfigurácia a spustenie merania - prepínanie medzi jednotlivými pripojenými vláknami, na ktorých je detekovaný výkon na výstupe. Optické prepínače SW1 a SW2 sú riadené cez výstupný signál z Arduino, kde dochádza k nastaveniu polohy prepínača, kedy je signál vedený cez oba prepínače na pripojenú vzorku. Táto poloha je signalizovaná aj na doske pomocou LED indikátorov počas merania (obr. 13).



Obr. 12: Schéma zapojenia pre riadenie optických prepínačov.



Obr. 13: Zhotovené zapojenie pre riadenie optických prepínačov.

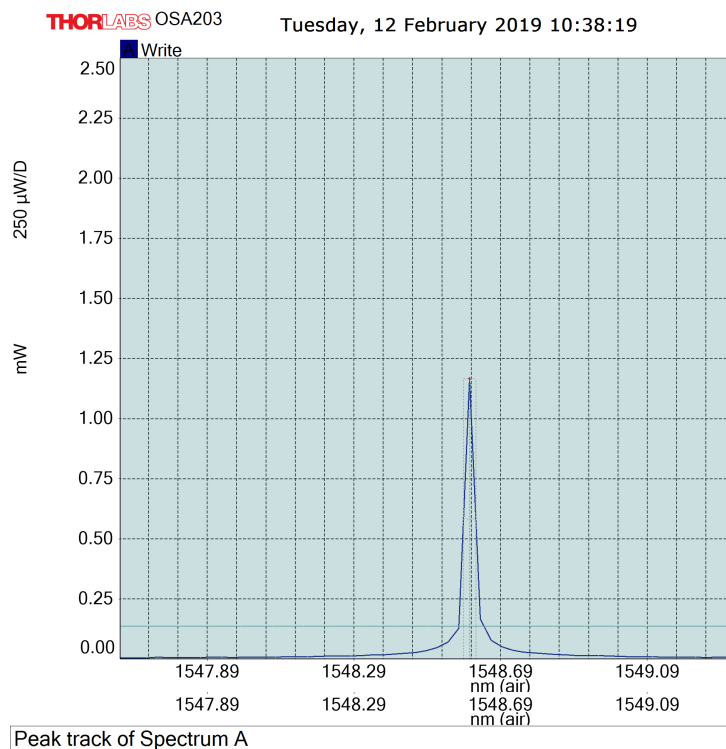
Celkom je možné zapojiť do meracieho systému osem vzoriek vlákien a zvoliť pre každé z nich vlnovú dĺžku, ktorá bude prechádzať vláknom. Tento výber je definovaný použitým optickým zdrojom, ktorý pracuje na štyroch vlnových dĺžkach a pripojením vláknových deličov je možný výber z ôsmich úrovní vstupného signálu.

5.1 Prístroje

Použitý optický zdroj pracuje s vlnovými dĺžkami 1310 nm, 1470 nm, 1550 nm a 1610 nm. Hodnota výkonu pre vlnové dĺžky je stanovená na 10 mW. Zdroj žiarenia disponuje parametrom

vlnovej dĺžky, určitou stabilitou a výstupným výkonom. Kvalita a stabilita vlnovej dĺžky bola zohľadnená počas prípravnej fázy.

Tabuľka 3 obsahuje hodnoty získané zo spektrálnej analýzy zdroja. Pre analýzu bol použitý software Thorlabs OSA (Optical Spectrum Analyzer). Využila sa funkcia analyzátora pre určenie úrovne signálu a vyhľadanie maxima v spektre (obr. 14).



Obr. 14: Spektrálna analýza v software OSA pre vlnovú dĺžku 1550 nm.

Rozsah λ predstavuje oblasť vlnových dĺžok, v ktorom sa nachádza maximálna hodnota výkonu. V tejto oblasti vlnových dĺžok je určená hodnota centrálnej (strednej) vlnovej dĺžky a maxima vlnovej dĺžky, ktorá je určená z parametra FWHM a z hodnoty dosiahnutého maxima výkonu. FWHM (Full Width at Half Maximum) slúži pre popis meranej hodnoty v aproxiácii pomocou gaussovej krivky ako súvislej symetrickej distribúcie energie a predstavuje šírku spektra pre polovicu maximálnej hodnoty odrazeného výkonu (pokles o 3 dB). V tomto prípade sa jedná o hodnotu centrálnej vlnovej dĺžky v tabuľke 3. Takmer identickou zhodou vlnových dĺžok pre jednotlivé rozsahy je preukázané, že zdroj je vhodný pre použitie v zapojení. Hodnota výkonu pre jednotlivé vlnové dĺžky je v tabuľke uvedená dodatočne, jedná sa o hodnotu v mW a bola určená pre jednotlivé vlnové dĺžky zdroja z námeru pomocou softwaru Thorlabs Optical Power Meter Utility a detektoru PM100USB použitého v zhotovenom meracom systéme.

Tabuľka 3: Spektrálna analýza pre vlnové dĺžky zdroja.

Rozsah λ [nm]	Centrálna λ [nm]	Maximum λ [nm]	FWHM [pm]	Výkon [mW] (PM100USB)
1305-1315	1310,47	1310,47	33,81	10,80
1465-1475	1468,83	1468,82	62,09	11,19
1545-1555	1548,61	1548,61	32,86	12,25
1605-1615	1609,95	1609,95	43,07	9,85

Pri tvorbe aplikácie sa taktiež zohľadnilo prípadné kolísanie výkonovej hodnoty a to pridaním funkcie priemerovacieho okna. Priemerovacie okno je možné stanoviť buď časovou hodnotou, alebo presným počtom prvkov v okne. Tým, že zaznamenaná hodnota je výsledkom priemerovacej funkcie, je možné predísť prípadnému kolísaniu hodnoty na výstupe meraného vlákna. Kolísanie hodnoty výkonu na výstupe sa zohľadnením výsledkov analýzy netýka použitého zdroja ale zahrňuje vplyv detekčného prístroja a aplikácie. Hlavný dôvod na pridanie funkcie priemerovacieho okna bolo predchádzanie výkyvu v hodnotách pri prepnutí vlnovej dĺžky počas detekcie. Výstupné konektory zdroja pre pripojenie vlákien vedúcich k optickému prepínaču sú typu FC/APC.

Optické prepínače sú označené v rámci systému ako SW1 a SW2. SW1 je pripojený na výstupe zdroja a plní funkciu prepínania zdrojov o istej vlnovej dĺžke a vstupnom výkone podľa voľby v aplikácii. SW2 slúži na prepínanie medzi pripojenými vláknami, vzorkami. Oba optické prepínače sú typu 1x8, umožňujú prepínať medzi ôsmymi výstupmi a sú zakončené konektorom FC/PC.

Zdroj a SW1 sú prepojené cez vláknové deliče. Vláknový delič umožňuje rozdelenie optického signálu zo vstupného SM vlákna do dvoch výstupných SM vlákien, s FC/APC zabrušením konektorov. Tento delič 1x2 pracuje s deliacim pomerom 90:10 percent vstupného výkonu a jeho vstupný konektor je pripojený priamo na zdroj. Vložný útlm deliča je blízky hodnote pre vlnovú dĺžku 1310 nm 0,51 dB pre 90 percent a 10,46 dB pre výstup na 10 percentách. Pri vlnovej dĺžke 1550 nm sa jedná o hodnoty 0,55 dB pre 90 percent výkonu a 10,53 dB pre 10 percent. V prílohe sú dopĺňujúce informácie z dokumentácie deličov. (Príloha B)

Výstupné vlákna z deliča vstupujú pevným spojom, zvarom do SW1. Zvar bol použitý na prepojenie za účelom minimalizovať útlm, ktorý by vznikol prepojením zakončení FC/APC a FC/PC prvkov. Pre minimalizovanie vplyvu spoja medzi SW1 a SW2 bol taktiež použitý zvar. Výstup 8 vlákien zo SW2 vedie na vstupnú časť panelu, pre pripojenie meraných vlákien, časť IN (obr. 18).

Tabuľka 4 obsahuje hodnoty vstupného výkonu pre pripojené vlákna a pre voliteľné vlnové dĺžky.

Tabuľka 4: Výkon na vstupe do pripojených vlákien, časť IN.

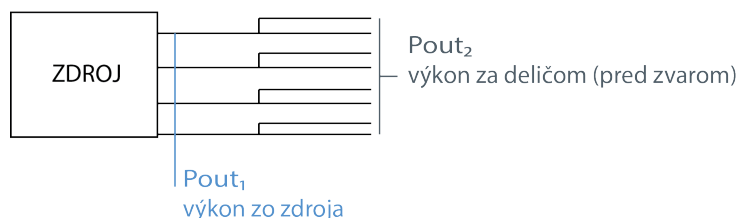
Pomer [%] 90:10 H:L	P_{out4} LabView APP verzia 13 časť IN [mW]							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
1310 H	7,755	7,888	7,867	7,920	7,699	7,844	7,822	7,767
1470 H	8,953	8,984	9,003	9,048	8,817	8,927	9,002	8,926
1550 H	8,524	8,622	8,614	8,660	8,402	8,61	8,611	8,578
1610 H	6,190	6,218	6,24	6,233	6,035	6,212	6,203	6,232
1310 L	0,854	0,877	0,873	0,878	0,849	0,869	0,869	0,854
1470 L	1,020	1,015	1,011	1,023	0,999	1,005	1,007	1,017
1550 L	0,848	0,833	0,830	0,846	0,818	0,831	0,830	0,839
1610 L	0,674	0,648	0,650	0,655	0,633	0,648	0,648	0,654

Detekčnú časť OUT predstavuje merací prístroj, Thorlabs PM100USB (obr. 18). Pre detekčný prístroj platí, že by mal poskytovať hodnotu výkonu s čo najmenšou odchýlkou a s rovnakou presnosťou v celom dynamickom rozsahu. Senzor detektora je S122C s rozsahom v oblasti vlnovej dĺžky 700 nm - 1800 nm. Softwarové prostredie Optical Power Meter Utility od spoločnosti Thorlabs bolo použité počas prípravy na kontrolu nameraných hodnôt výkonu a v princípe pracuje s rovnakými ovládačmi ako navrhnutá aplikácia. Do výstupnej časti panelu OUT (obr. 18) je privedený delič 1x8 a výkon z optického vlákna je ním vedený na hlavicu detekčného senzora, konektor FC/PC.

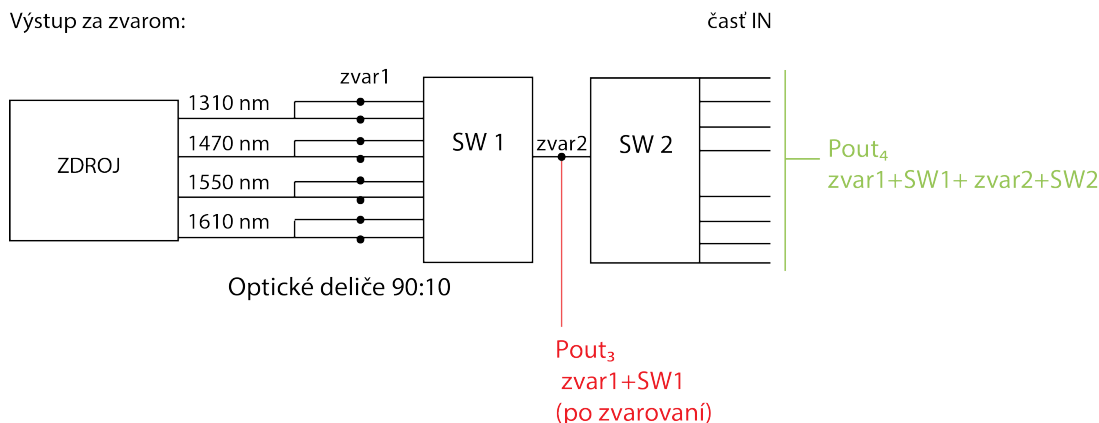
Detektor je cez USB port pripojený do počítača, rovnako i Arduino. Pre obe zariadenia je nevyhnutné mať nainštalované ovládače. Pre detektor Thorlabs PM100USB sa jedná o ovládače dostupné zo stránok výrobcu. Použitý Arduino je typu Arduino Nano s mikrokontrolérom Atmel ATmega328 a pracovným napätím 5 V. Pre komunikáciu je použitý kompatibilný ovládač pre čip CH340.

Výkon na výstupe prvkov meracieho systému bol počas prípravy a v jednotlivých fázach porovnávaný a taktiež sa jeho hodnoty porovnávali meraním cez vytvorenú aplikáciu a priamo v softwarovom prostredí od firmy Thorlabs.

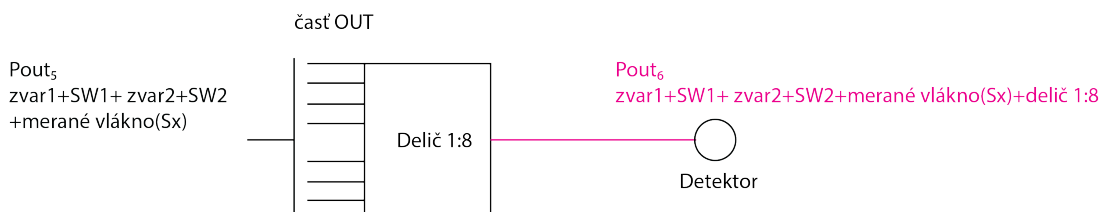
Výstup za deličom pred zvarom:



Obr. 15: Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon pred zvarom.



Obr. 16: Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon na vstupe pre časť panelu IN. Hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.

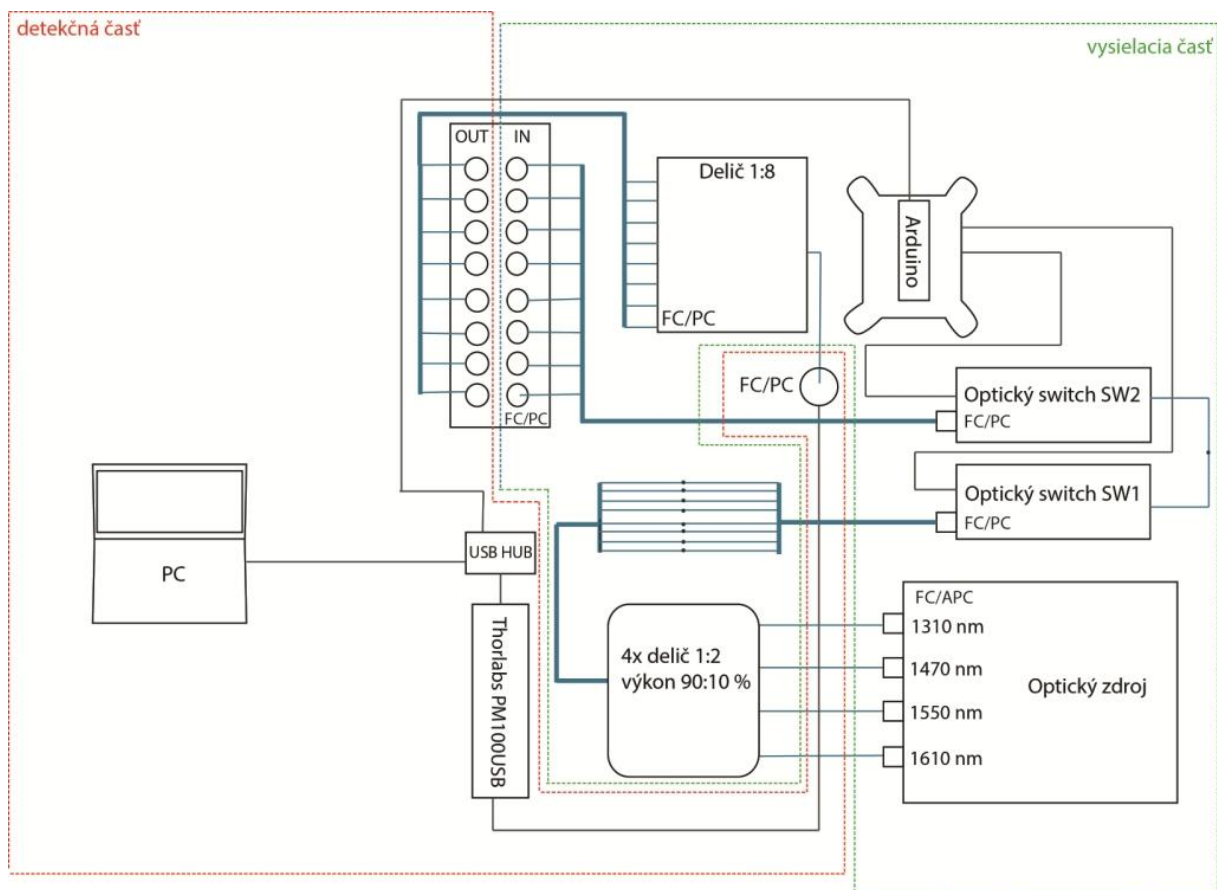


Obr. 17: Meranie výkonu za prvkami systému počas prípravy. Výkon na vstupe pre časť panelu OUT a za optickým deličom.

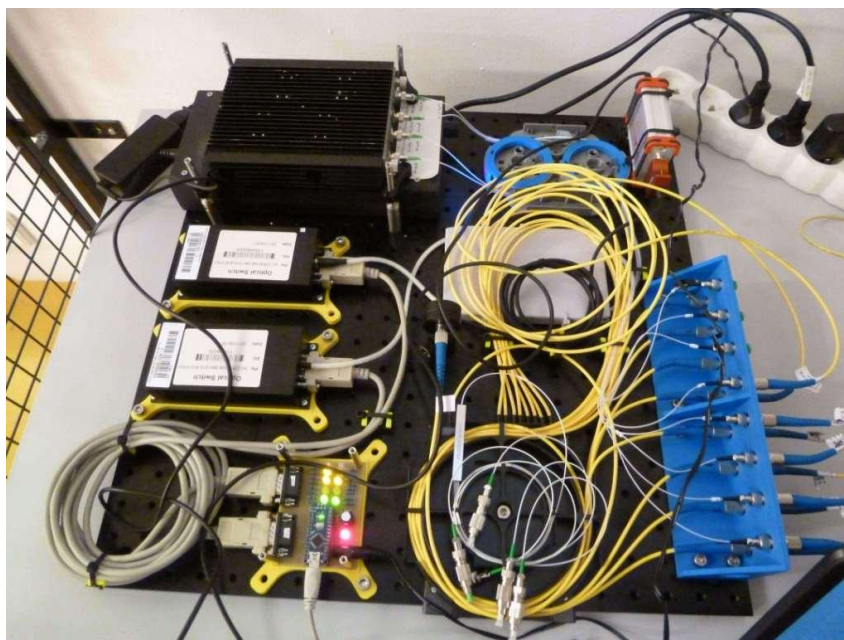
Tabuľka 5: Hodnoty výkonu na výstupe jednotlivých častí systému. Výkon P_{out6} S7 sú hodnoty na výstupe pripojeného vlákna v časti OUT.

Pomer [%] 90:10 H:L	P_{out1}	P_{out2}	P_{out3}	P_{out6} S7
Vlnová dĺžka [nm]	PM100 [mW]	PM100 [mW]	PM100 [mW]	APP [mW]
1310 H	10,800	10,740	9,202	0,091
1470 H	11,700	9,086	10,190	0,114
1550 H	12,200	7,166	9,781	0,119
1610 H	9,926	8,482	7,171	0,091
1310 L	-	1,077	0,946	0,010
1470 L	-	1,258	1,192	0,013
1550 L	-	0,986	0,982	0,012
1610 L	-	0,897	0,983	0,010

Hodnoty výkonu za deličom sú rádovo posunuté a výrazne nižšie ako na vstupe do meraného vlákna a to z dôvodu útlmu deliča. Ten vnáša útlm o hodnote blízkej 10 dB. (Príloha B) Jedná sa o porovnanie hodnôt z tabuľky 4 S7 IN a hodnôt z tabuľky 5 S7 OUT. Použitie deliča je v súčasnej podobe meracieho systému potrebné, a v budúcnosti by mohol byť nahradený prvkom s nižším vloženým útlmom.



Obr. 18: Schématický nákres pre zhotovený merací systém.



Obr. 19: Zostrojená doska s meracím systémom.

5.2 Návrh aplikácie pre meranie výkonu na pripojených optických vláknach s použitím zhotoveného meracieho systému

Aplikácia bola tvorená v programovacom prostredí LabView. Použité sú dostupné knižnice pre uľahčenie komunikácie medzi zariadeniami a ich komunikačnými zbernicami, ktoré slúžia ako hardvérový základ. Jedná sa o knižnice pre Arduino ako riadiacu jednotku a Thorlabs PM100USB použitý ako detektor. V programovej časti je jadrom aplikácie model State Machine (obr. 20), jednotlivé prechodové stavy, ku ktorým boli postupne dopĺňané ďalšie funkcie.

Popis jednotlivých stavov:

Start - defaultný stav, pokiaľ beží interval medzi meraniami je aplikácia vo fáze Start, po nastavení počiatočných hodnôt a voľbe Výber vzorka/ Výber zdroja by mala byť v ďalšom kroku nastavená adresa, pokiaľ sú oba prepínače už nastavené a nedochádza k ukončeniu alebo chybe počas behu, aplikácia rovnako prechádza do ďalšieho kroku Set Address.

Set Address - podľa voľby vzorky vlákna - SW2 a podľa voľby pre zdroj vlnovej dĺžky - SW1 sa určí, na ktorom prepínači sa nastaví adresa. Adresa určuje polohu v optickom prepínači.

Send Address - nastavenie adresy na SW1, čo znamená nastavenie jednej z vybraných vlnových dĺžok pod možnosťou Výber zdroj. Vlnová dĺžka je následne použitá pre konfiguráciu meracieho prístroja. Ako ďalšia fáza musí nasledovať stav Enable, signál je prenesený na výstup optického prepínača SW1.

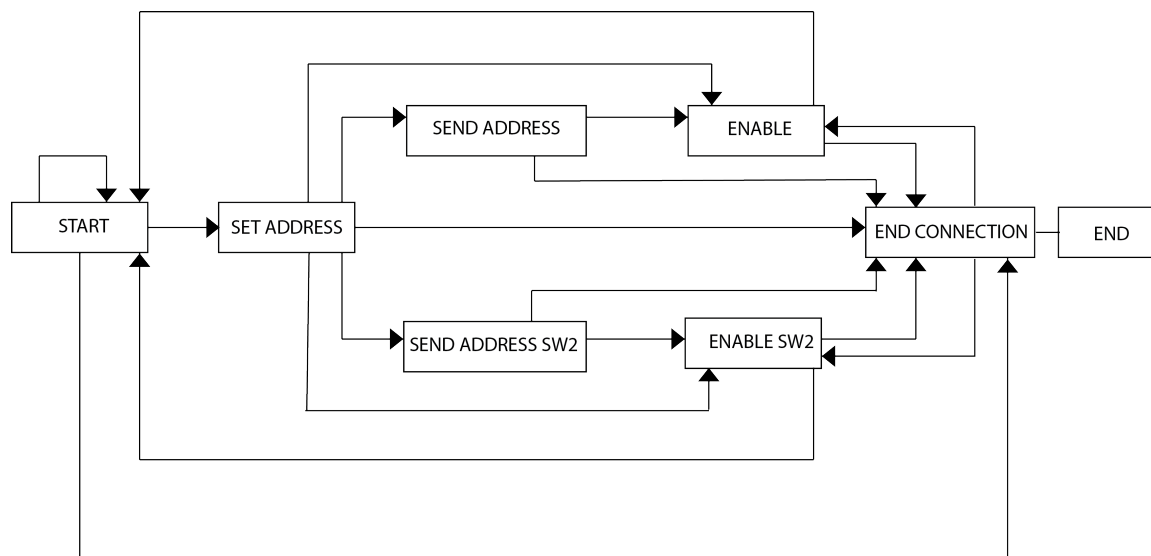
Send Address SW2 - nastavenie adresy na SW2, čo znamená nastavenie jednej z adries určujúcej vzorku optického vlákna, postupný prechod výberom pod možnosťou Výber vlákno. Ako ďalšia fáza musí nasledovať stav Enable 2, signál je prenesený na výstup optického prepínača SW2.

Enable - po nastavení adresy Send Address, nasleduje fáza Enable, umožní prechod signálu cez SW1, následne je umožnená voľba merania - meranie/zápis.

Enable SW2 - po nastavení adresy Send Address SW2, nasleduje fáza Enable 2, umožní prechod signálu cez SW2, a tým aj na vstup do pripojeného vlákna v časti IN panelu meracieho systému.

End Connection - nasleduje po voľbe STOP korektné ukončenie spojenia s kontrolérom a prechod do posledného kroku. Nastáva taktiež po uplynutí celkovej doby merania alebo pri chybe behu aplikácie.

End - finálny krok pre ukončenie behu aplikácie.



Obr. 20: Programová štruktúra.

Samotný priebeh merania je sprevádzaný zápisom nameraných hodnôt do súboru. Hodnoty výkonu sú okrem vykreslenia v grafe na hlavnom paneli automaticky ukladané do súboru.

Ďalšou možnosťou aplikácie je vytvorenie štruktúrovaného TDMS (Technical Data Management Streaming) súboru pre ich neskoršie spracovanie. Zvoliť zápis do TDMS súboru je možné v časovom intervale. Následne je možné povoliť odosielanie súboru na uvedenú mailovú adresu užívateľa, k tomu je však nutné pripojenie do internetovej siete.

V aplikácii je taktiež možné otvoriť už existujúci súbor s nameranými hodnotami a vykresliť dáta. Vykreslenie grafu z merania je doplnené o možnosť aproximácie krivky priebehu pre konkrétny typ vlnovej dĺžky.

Dáta sú automaticky ukladané do súboru, vo formáte csv do priečinku vybraného v inicializačnej časti (Settings). Okrem súboru CSV (Comma-Separated Values) je možné zvoliť ukladanie i do TDMS súboru, v ktorom sú hodnoty zaznamenané podľa vlnovej dĺžky zdroja do samostatných listov. Funkcia Open File umožňuje ešte pred samotným meraním zvoliť už existujúci CSV alebo TDMS súbor, ktorý vykreslí dáta.

Pri nastavení merania v menu Settings je možné využiť aj voľbu uloženia konfigurácie s aktuálnou podobou volieb a pri opätovnom spustení nahráť konfiguračný súbor, jedná sa štandardne o súbor config.ini a ukladá sa do priečinka zvoleného pre ukladanie súborov.

Dôležitou súčasťou je aj monitorovanie chýb počas behu aplikácie. Pri nemožnosti naviazania spojenia s riadiacou jednotkou dôjde k ukončeniu aplikácie. Chyby, ktoré by sa mohli objaviť počas behu aplikácie sú logované v samostatnej karte Errors.

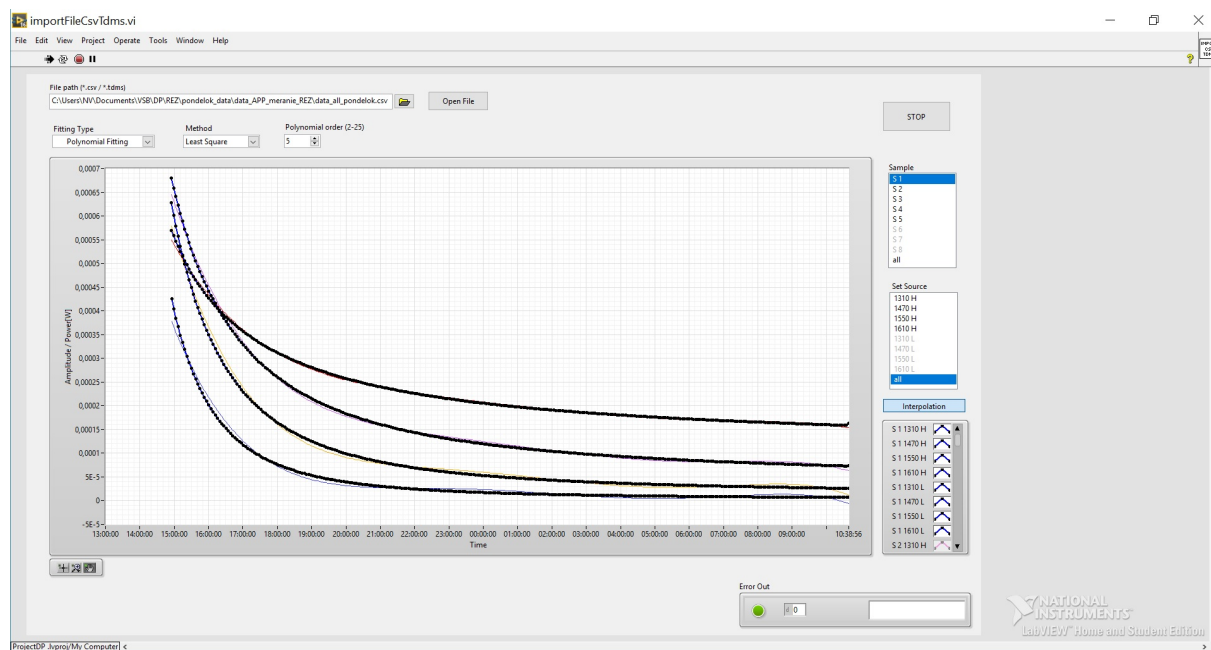
5.3 Ovládanie aplikácie, konfigurácia merania

Hlavná časť aplikácie, predný panel, pozostáva z konfiguračných prvkov a z grafu s vykresľovaním charakteristík výkonu pre zvolené vlákna v reálnom čase.

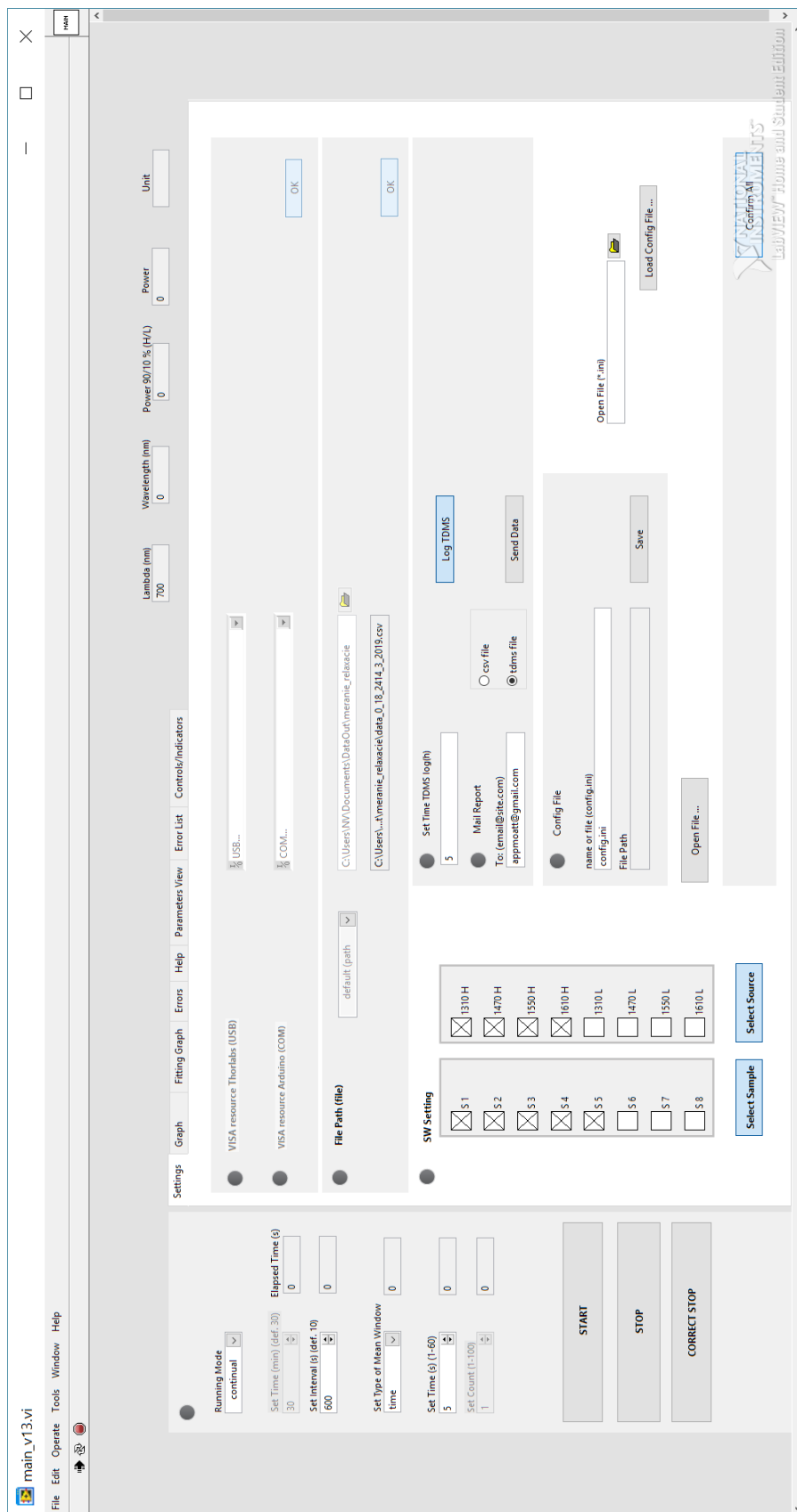
Konfiguračné prvky predstavujú výber zariadení pre komunikáciu (mikrokontrolér, merací prístroj), nastavenie cesty pre ukladanie nameraných dát a nastavenia parametrov merania - spočíva vo zvolení celkovej doby merania, intervalu medzi meracími cyklami, voľby priemerovacieho okna pre hodnotu výkonu, výber zdroja (1310 H - 1610 L), výber vzorky vlákna (S 1-8).

Samotné meranie je spustené voľbou Start a podmienené nastavením merania a konfigurácie. Ukončenie voľbou Stop alebo Correct Stop pre dokončenie celého bežiacieho meracieho cyklu. Dáta, hodnoty výkonu sú priebežne zaznamenané do súboru. Bližší popis konfigurácie a ovládanie aplikácie je v prílohe (Príloha A.3).

Ako príklad konfigurácie merania je možné nastaviť v aplikácii nasledovné (obr. 22). Meranie je nastavené v režime continual, čo znamená, že bude prebiehať, pokiaľ nie je ukončené manuálne užívateľom stlačením tlačidla Stop alebo Correct Stop na hlavnom paneli. Interval pre meranie je nastavený na hodnotu 600 s, to značí, že po každom meracom cykle, kedy dochádza k meraniu na všetkých vybraných prvkoch vo voľbe SW Setting, nastane 10 minútový interval. Voľby v paneli SW Setting musia byť potvrdené. Na karte Settings je vybrané spojenie s mikrokontrolérom a detektorom, obe sú pripojené cez USB port k PC. Vo voľbe File Path je zaznačený adresár, do ktorého sa budú ukladať súbory s nameranými hodnotami. Pri vytváraní súboru pre zápis je potvrdená voľba TDMS log a časový interval, v akom sa budú súbory vytvárať. Všetky voľby konfigurácie musia byť potvrdené stlačením Confirm All. Potom je možné spustiť meranie stlačením Start.



Obr. 21: Vykreslenie dát zo súboru.

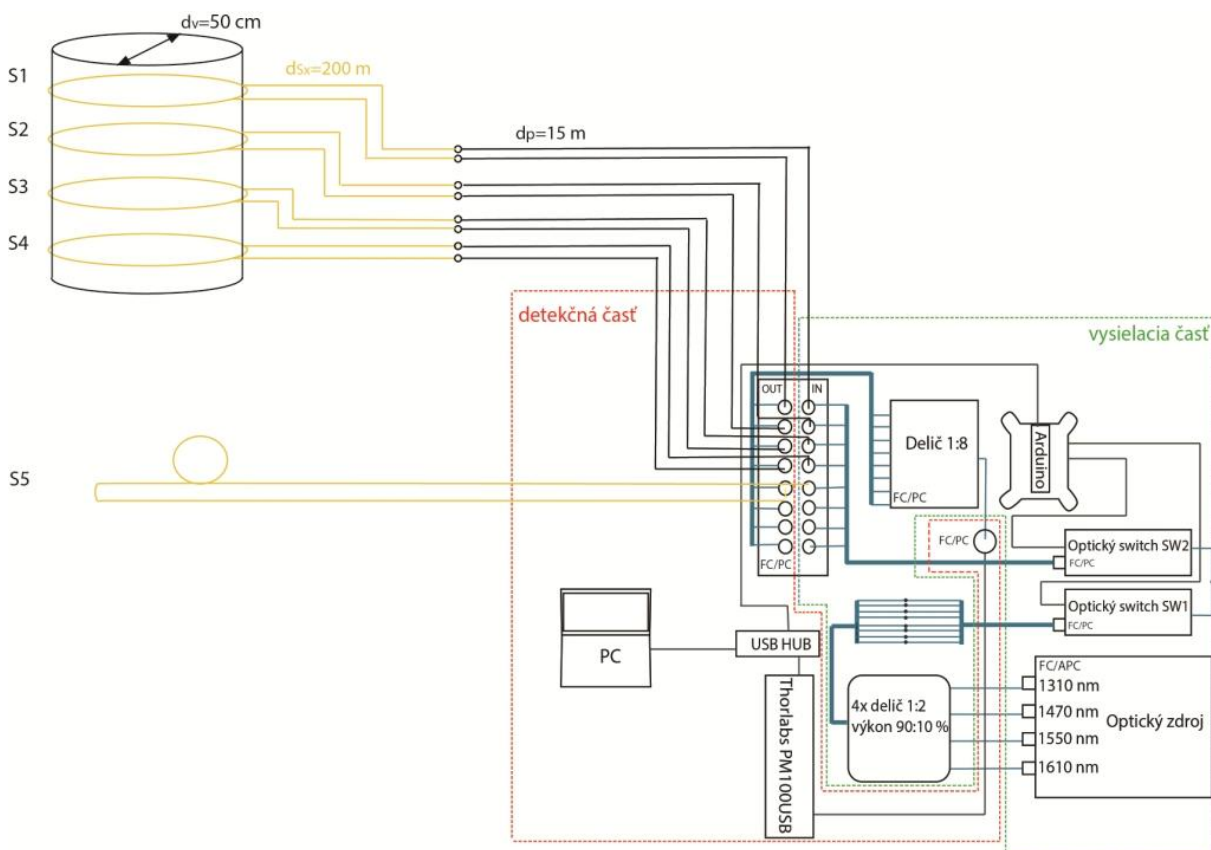


Obr. 22: Hlavný panel aplikácie.

6 Meranie útlmu na vybraných optických vláknach pomocou naprogramovanej aplikácie

6.1 Príprava merania

Príprava merania spočívala v overení fungovania meracieho systému a v príprave vzoriek vlákna, ktoré budú vystavené ožarovaniu. Celkom sa pripravili štyri vláknové vzorky. Vlákná boli stanovenej dĺžky 200 m, namotané na valci s priemerom cca 50 cm a pevne prichytené na vonkajšom obvode valca. Obrázok 18 vizualizuje valec s vláknami a pripojenie k meraciemu systému.



Obr. 23: Schéma meracieho systému s pripojenými vláknami.

Vlákná boli počas prípravy premerané pomocou metódy OTDR pre kontrolu jednotlivých trás.

Následne sú uvedené použité optické vlákna, skrátene vzorky S1, S2, S3, S4, jedná sa o vláknové vzorky, ich dĺžka je stanovená na 200 m a pri príprave sa kvôli pripojení konektorov na vzorky nechala istá rezerva v dĺžke, ktorá uľahčila manipuláciu. Dĺžka, ktorá je patrná z meraní, je uvedená v tabuľke 6. V prípade vlákna S1 sa jedná o vlákno štandardu ITU-T G.655, vlákno s posunutou disperznou charakteristikou, ktoré je navinuté len s primárnou ochranou. Meranie

pomocou OTDR preukázalo znateľne posunutú charakteristiku vlákna, vzhľadom na iný typ použitého predradného vlákna. Vlákno S2 predstavuje vzorku vlákna, ktoré chráni len primárna ochrana, preto je náchylnejšie na vonkajšie vplyvy. Vlákno S3 je štandardným vláknom, upravené pridaním zvarov. Celkom bolo zhotovených 20 zvarov s odstupom 10 m. Celková príprava zabrala navyše času a to z dôvodu kontroly vložného útlmu jednotlivých zvarov. Snahou bolo zachovať parameter útlmovú krivku vlákna v medziach bez výrazného nárastu útlmu na jednotlivých zvaroch. Vlákno S4 je štandardné vlákno chránené sekundárnou ochranou.

Tabuľka 6: Vlákna použité pre meranie.

Vlákno	Popis		Dĺžka [m]
S1	vlákno s nenulovou posunutou disperznou charakteristikou	G.655	208,65
S2	vlákno s primárnou ochranou	G.652.D	211,28
S3	zvary, na trase každých 10 m, typ vlákna štandardné	G.652.D	203,02
S4	štandardné vlákno	G.652.D	200,67

Okrem uvedených vzoriek vlákien S1 až S4, ktoré boli vystavené ožarovaniu sa pripojilo i vlákno S5, ako referenčné vlákno. K hodnotám výkonu na výstupe tohto vlákna sa vzťahujú hodnoty na výstupe ožarovaných vlákien pre výpočet útlmu. Všetky vzorky navinuté na valci S1 až S4, boli pri reálnom meraní pripojené k panelu meracieho systému cez prepojovacie vlákna dĺžky 15 m. Tieto vlákna boli použité z dôvodu uľahčenia manipulácie v prostredí žiariča, pre prepojenie navinutých vzoriek na valci v šachte ožarovne s miestnosťou, v ktorej prebiehalo meranie.

6.2 Meranie na pracovisku v ÚJV, Řež

Meranie prebiehalo 5 dní na pracovisku v ÚJV oddelenia 2305, v priestoroch ožarovne. V miestnosti sa nachádzajú dva zdroje radiačného žiarenia, ožarovače kobaltový ožarovač ROZA a kobaltový ožarovač PRAZDROJ. Oba zdroje sú studňového typu s uzavretými rádionuklidovými žiaričmi obsahujúcimi ^{60}Co v kovovom stave [1].

Pri testovaní sa použil kobaltový ožarovač PRAZDROJ. Disponuje 2 tyčovými zdrojmi ^{60}Co . V priestore valcovej šachty predstavuje ožarovaný priestor jej priemer rovný 100 cm s výškou 105 cm [21].

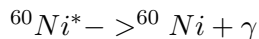
Samotný priestor ožarovne, bol počas spustenia ožarovania uzavretý a doska s meracím systémom, PC a prístroj OTDR boli umiestnené v operatívnej miestnosti pred vstupom do ožarovne. Celý proces prebiehal pod dohľadom pracovníkov z ÚJV a v súlade s predpismi a bezpečnostnými opatreniami pre prácu na danom pracovisku.

Pripravený valec s namotánymi vzorkami vlákien S1, S2, S3, S4 bol vložený do valcovej šachty, do pôsobiska poľa žiariča. Po umiestnení do šachty už nedochádzalo k jeho opätovnému vytiahnutiu až do doby ukončenia ožarovania. Manipulácia počas merania sa týkala už spomenutých prepojovacích vlákien vyvedených z ožarovne. Na doske meracieho systému v paneli

IN a OUT sa opätovne pripojovali po kontrolnom premeraní trasy reflektometrom. Spusteniu merania predchádzalo overenie continuity, celistvosti trás metódou OTDR.

Následne bolo spustené meranie v aplikácii a zároveň sa spustil proces ožarovania vzoriek. Vzorky počas merania boli vystavované žiareniu gama o energii buď 1,17 MeV alebo 1,33 MeV, v priemere sa jedná o gama žiarenie s energiou 1,25 MeV [1]. Testovanie vlákien v prostredí žiariča malo trvať po dobu ožarovania materiálu dávkou 50 kGy.

Emitovanie žiarenia je vyvolané reakciou:



Dosiahnutie stabilnej hodnoty pre Ni, je sprevádzané žiarením gama s hodnotou energie, o ktorej sa dá tvrdiť, že nevyvolá následnú rádioaktivitu ožarovaného predmetu [1]. Premene predchádza prvý stupeň rozpadu, pri ktorom sa z ^{60}Co uvoľňuje beta častica, e^- , antineutríno ν_e a Ni^* v excitovanom stave.

V aplikácii bolo meranie konfigurované s nasledovnými parametrami. Running Mode parameter bol nastavený na voľbu continual, pretože má prebiehať až po prerušenie užívateľom. Voľba zdroja sa týkala vstupného výkonu pre vlnové dĺžky 1310 nm, 1470 nm, 1550 nm, 1610 nm na úrovni 90 percent. Podľa reálneho zapojenia sa premeriavali vzorky S1, S2, S3, S4, S5. Po jednom meracom cykle, premeraní všetkých zvolených vzoriek a vstupných úrovní výkonu pre vlnové dĺžky sa stanovil interval, pauza medzi cyklami na 120 s. Z každého námeru sa vyhodnotil výkon z priemerovacieho okna dĺžky 5 s. Táto hodnota sa zaznamená do súboru s príponou CSV a rovnako aj do TDMS súboru. Interval pre tvorbu súborov je stanovený na 1 hodinu. Pre konfiguráciu bol vytvorený súbor config.ini, ktorý je možné použiť pri opätovnom spustení merania.

6.2.1 Merania v ožarovni

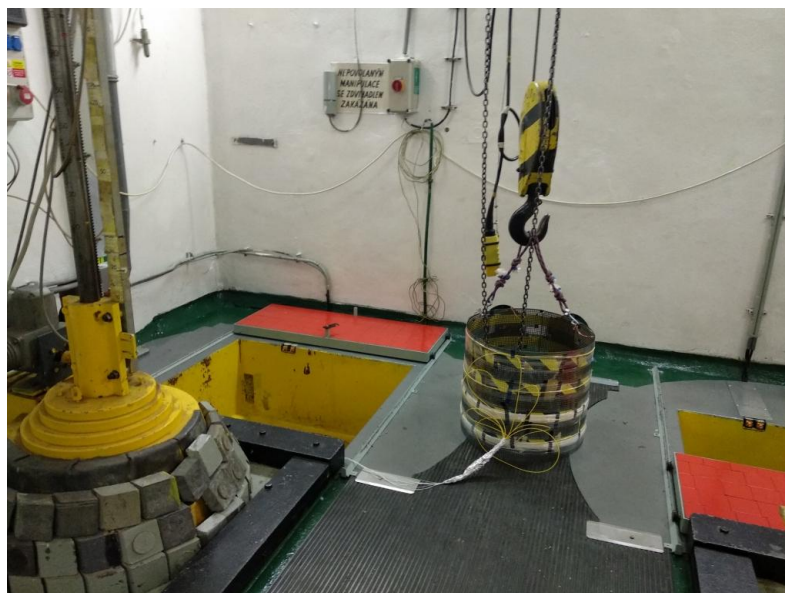
Po prvom dni od spustenia merania, boli vlákna vystavené žiareniu celkom 20 hodín, pričom sa určila celková doba potrebná na ožarovanie dávkou 50 kGy. Výpočtom sa stanovila doba trvania na 88,7 hodín (88 hodín a 42 minút). Preto bol predpokladaný koniec merania stanovený na piaty deň.

Každý deň sa proces ožarovania prerušil. Doba prerušenia nebola daná presným časom, odhadom prerušenie trvalo jednu hodinu, doba závisela od priebehu OTDR merania. Meranie v aplikácii sa prerušilo v rovnakom čase ako ožarovanie vzoriek vlákien a následne sa vlákna premeriavali danou metódou. Po overení, že na úseku vlákna, ktoré bolo ožarované, je výkon žiarenia dostatočný pre preklopenie trasy a ožarovanie nespôsobilo útlm znemožňujúci ďalšie meranie sa pokračovalo v procese ožarovania vzoriek vlákien. Meranie sa spustilo podľa konfigurácie vytvorenej pre meranie ožarovania.

Z nameraných dát je možné určiť dobu prerušenia testovania a stanoviť celkový čas merania v aplikácii (tab. 7).

Tabuľka 7: Časový záznam o priebehu merania v ožarovni.

Č.m.	Spustenie merania v APP v čase	Prerušenie v čase	Dĺžka merania	Dĺžka ožarovania [h]
1	po 11.03. 2019 14:55:04	út 12.03.2019 10:40:23	19:45:19	20,00
2	út 12.03. 2019 11:46:29	st 13.03. 2019 10:49:41	23:03:12	23,00
3	st 13.03. 2019 11:46:51	št 14.03. 2019 10:30:31	22:43:40	22,45
4	št 14.03. 2019 11:29:42	pá 15.03. 2019 10:28:28	22:58:46	23,25
Čas celkom	91:33:24	3:02:27	88:30:57	88,70



Obr. 24: Valec s optickými vláknami.



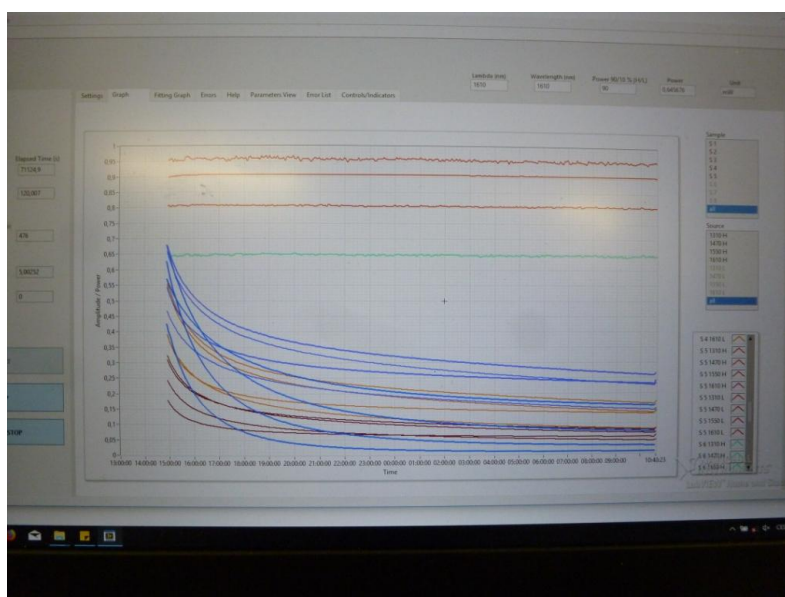
Obr. 25: Vyvedenie prepojovacích vlákien zo šachty.



Obr. 26: Vloženie valca s vzorkami do oblasti žiariča.



Obr. 27: Monitorovacie pracovisko.

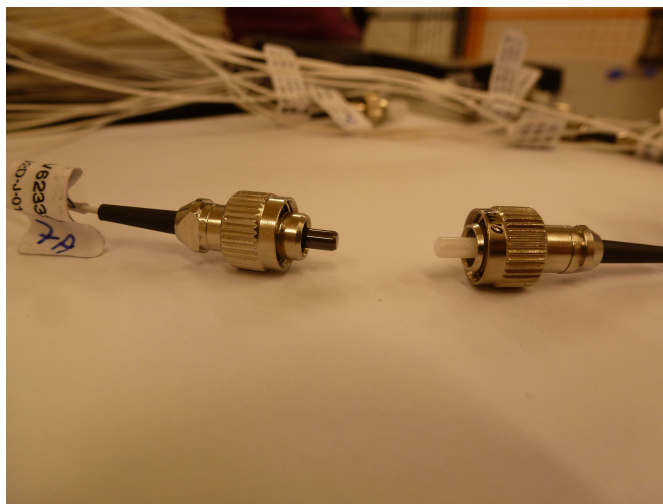


Obr. 28: Graf z aplikácie po prvom dni merania.

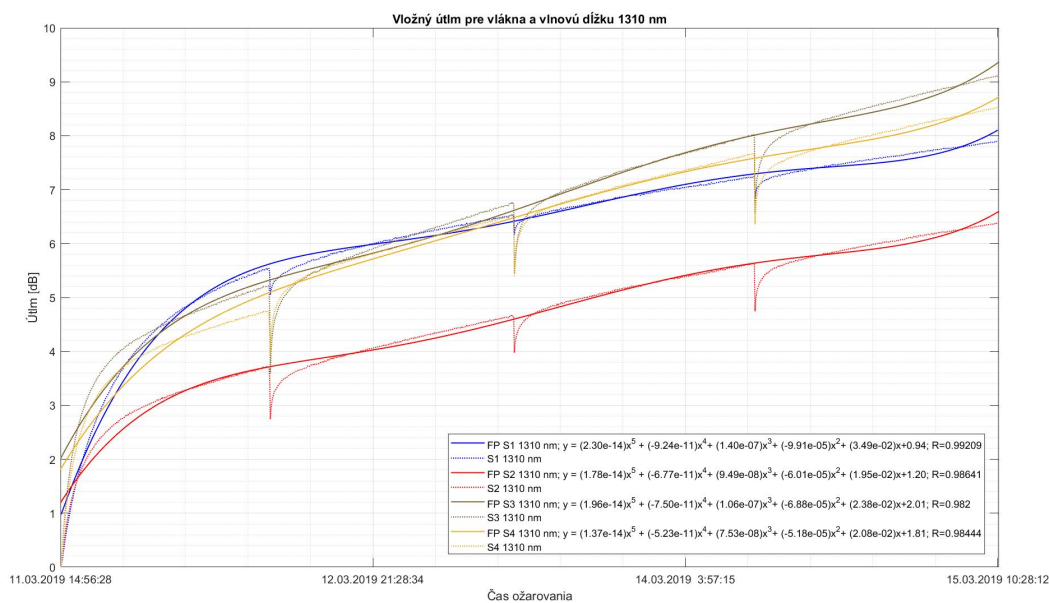
6.3 Výsledky merania

Pre zhodnotenie merania ožarovania sú priložené grafy s hodnotami útlmu pre jednotlivé vlákna. Na grafoch sú vykreslené útlmové charakteristiky s aproximáciou jednotlivých priebehov (obr. 30-33). Jedná sa o nárast útlmu počas obdobia piatich dní ožarovania vlákien. Značný bol útlm počas prvého dňa ožarovania na všetkých vláknových vzorkách a vlnových dĺžkach. V každom dni bolo meranie prerušené počas pripojenia vlákien k OTDR reflektometru a merania na vzorkách.

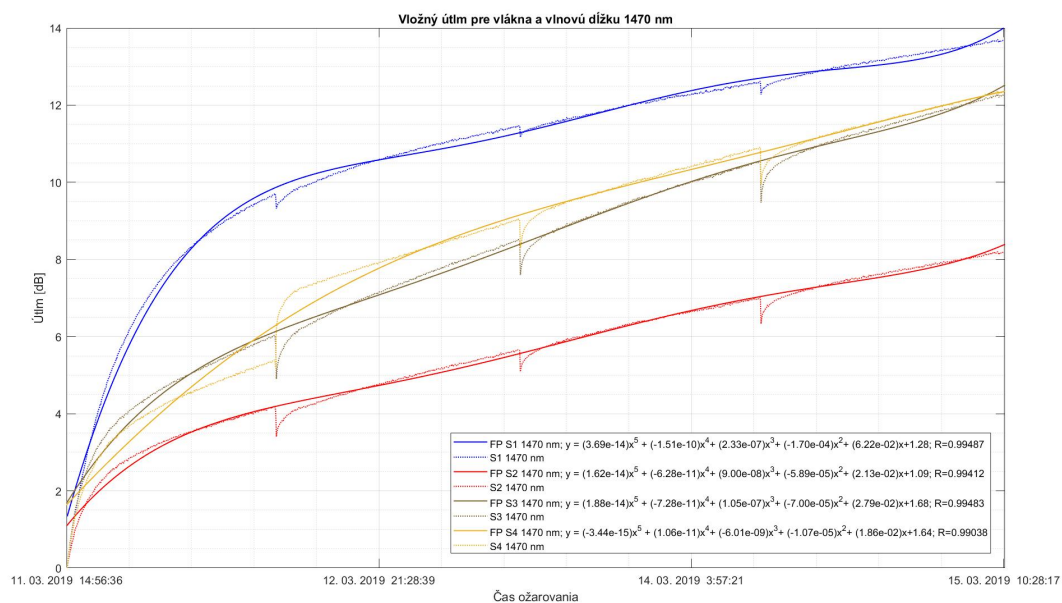
Toto prerušenie sa objavuje na grafoch ako náhly pokles útlmu. Pri vzorke S4 a prvom prerušení je zjavný skokový nárast hodnoty útlmu. Predpokladom je, že je spôsobený chybou pri opätovnom zapojení do meracieho systému, nesprávne zasunutý konektor alebo vnesená nečistota.



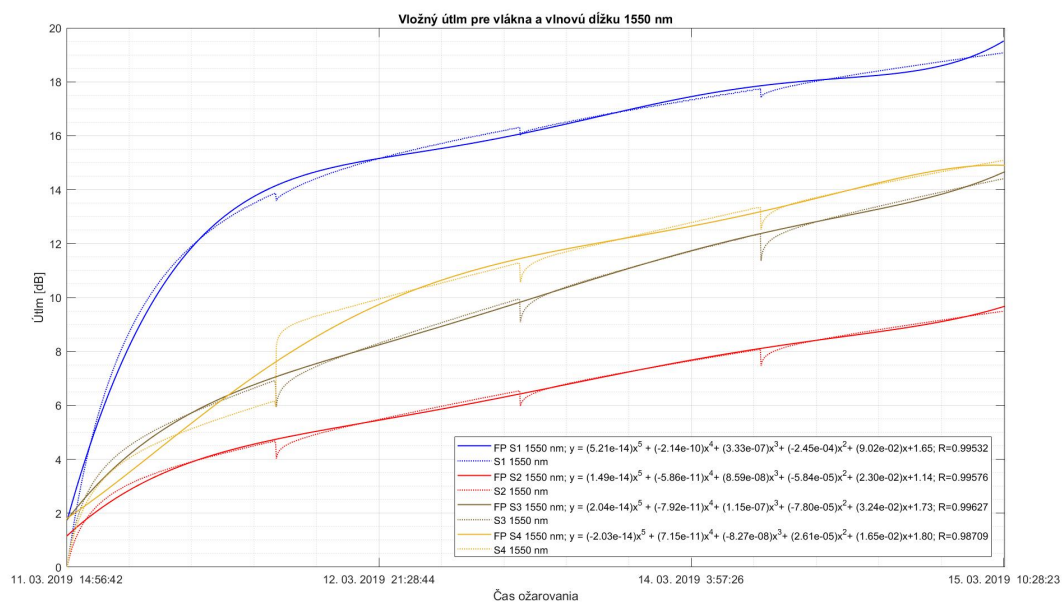
Obr. 29: Konektor prepojovacieho vlákna po ukončení ožarovania. Ferula pripojená k ožarovanej vzorky stmavla.



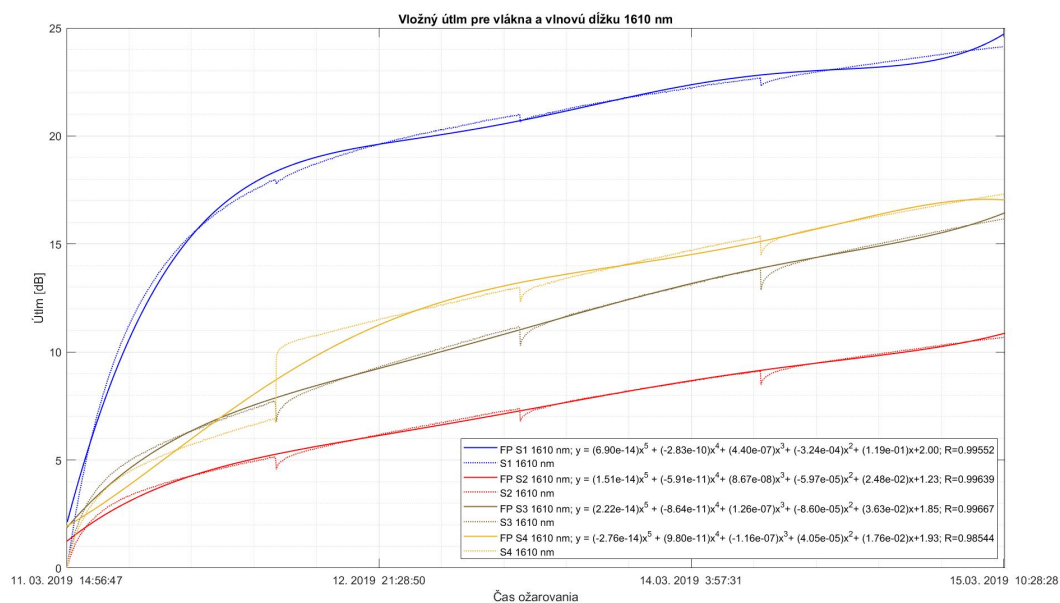
Obr. 30: Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1310 nm.



Obr. 31: Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1470 nm.



Obr. 32: Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obr. 33: Útlm pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1610 nm.

Tabuľka 8: Výsledky meraní OTDR.

Merný útlm [dB·km ⁻¹]								
Vlákno	S1		S2		S3		S4	
Vlnová dĺžka [nm]	1310	1550	1310	1550	1310	1550	1310	1550
0	0,396	0,245	0,309	0,476	17,261	11,471	0,442	0,216
1	28,343	73,497	21,696	25,190	50,410	51,988	29,959	35,303
2	32,897	83,405	26,910	34,186	57,714	66,042	36,632	50,955
3	35,649	95,669	30,521	41,189	63,069	77,566	41,181	58,902
4	38,927	95,897	34,322	47,966	68,752	88,007	49,391	69,571

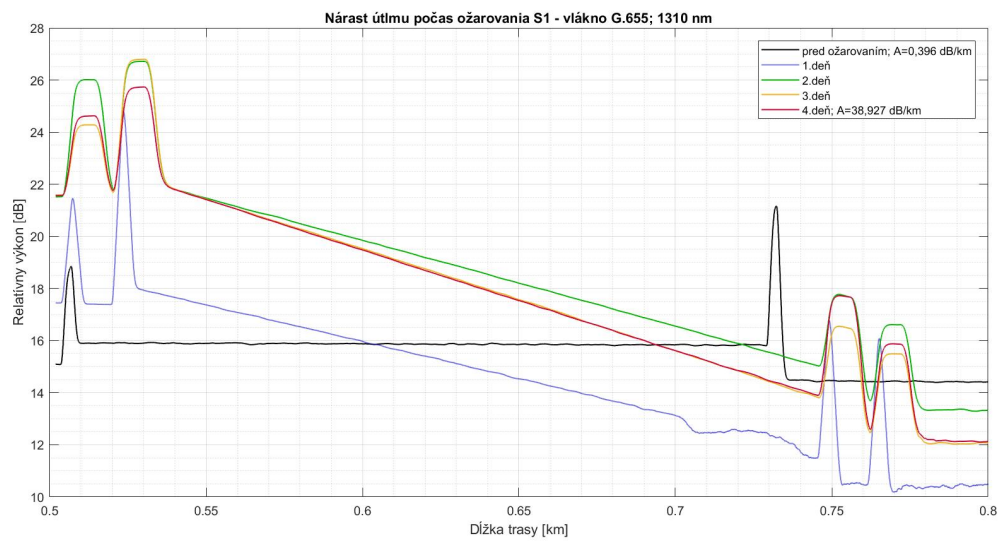
Tabuľka 9: Výsledky meraní OTDR s hodnotami vložného útlmu meraného vlákna.

Vlákno	Vložný útlm [dB]							
	S1		S2		S3		S4	
	1310	1550	1310	1550	1310	1550	1310	1550
Vlnová dĺžka [nm]								
0	0,017	0,044	0,121	0,177	3,633	2,287	0,104	0,174
1	6,130	15,330	4,712	5,546	9,717	9,465	6,325	6,976
2	6,932	16,599	5,844	7,371	11,288	13,802	7,521	8,642
3	8,153	19,529	6,206	8,476	11,918	13,750	7,961	11,626
4	8,148	19,553	6,931	9,642	13,985	18,785	8,918	12,967

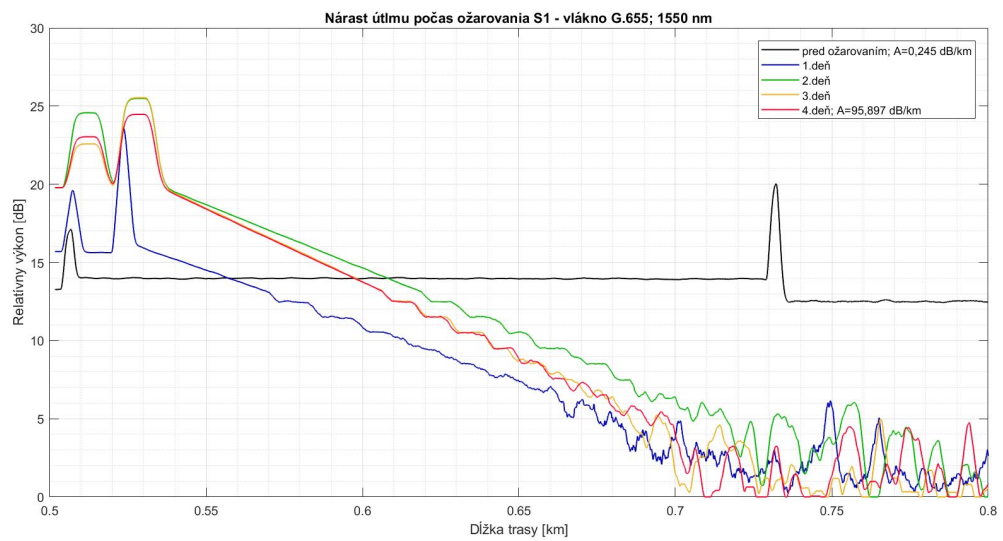
Kým merný útlm na vzorkách vlákien počas prvého merania (tab. 8), pred spustením ožarovania, je pre obe merané vlnové dĺžky minimálny, v závislosti od typu vlákna, pri ďalšom meraní je zaznamenaný výrazný nárast. Postupne hodnoty útlmu narastali ale v menšej miere ako po prvom dni ožarovania. Z útlmových charakteristík v grafoch je značný zhodný nárast vložného útlmu ako je zjavný z hodnôt v tabuľke 9 (obr. 30, obr. 32). Nárast je značný s rastúcou vlnovou dĺžkou.

Vlákna S1 a S2, ktoré sú chránené len primárnou ochranou sa líšia v náraste útlmu a dôvodom bude materiál a prenosové parametre vlákna S1. Vlákno G.655, aj keď v malej miere, dosahuje vyššie hodnoty útlmu pre vlnové dĺžky 1550 nm a 1610 nm ako vlákno G.652.D (tab. 2). Pri porovnaní vlákien S2 a S4, ktoré sa líšia ochrannou vrstvou vlákna S4, je porovnanie nárastu komplikovanejšie, kvôli vnesenej chybe na konektore vlákna S4 po prvom dni merania. Avšak je možné z vykreslených grafov hovoriť u vyšších hodnotách útlmu pre vlákno S4 v porovnaní s vláknom S2 pre všetky uvedené vlnové dĺžky. Vlákno S3 upravené zvarmi dosahuje útlm o hodnotách podobných ako vlákno S4. Dôležitú úlohu pri náraste útlmu zohrávajú ochranné vrstvy a materiál vlákna.

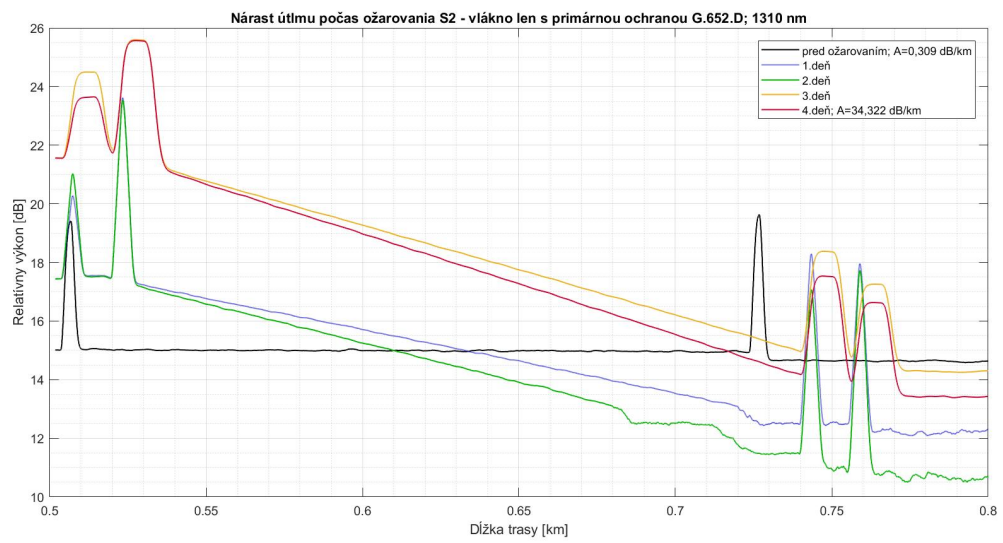
Pri porovnaní meraní získaných z OTDR je nutné zohľadniť, že k meraným vláknam boli pridané prepojovacie vlákna a na spojoch týchto vlákien vzniká vložný útlm a odrazy na trase vymedzujú krivku, z ktorej je odčítaná hodnota útlmu. (obr. 34 - 41) Pri porovnaní hodnôt je meranie na vlnovej dĺžke 1550 nm zaťažené značne vyššou hodnotou útlmu.



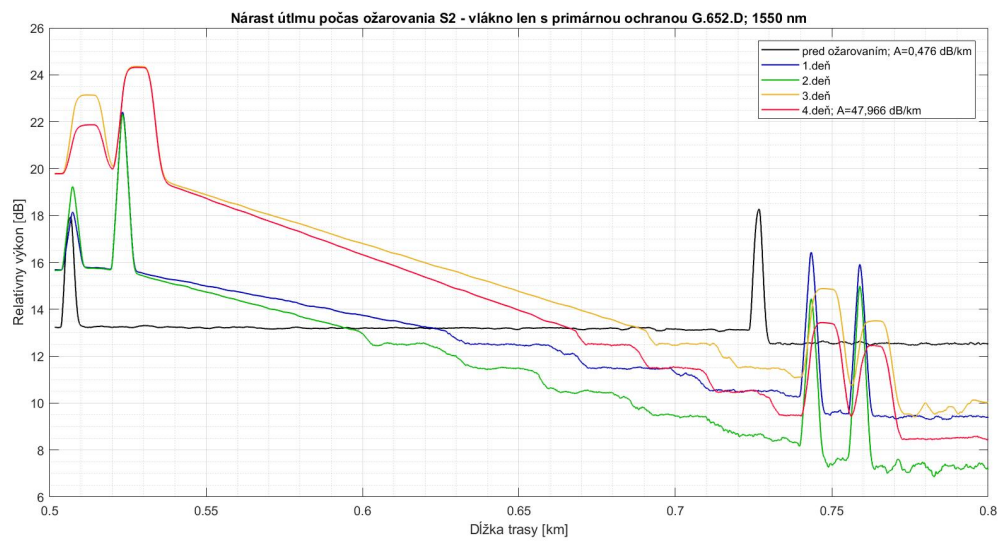
Obr. 34: Vlákno S1 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.



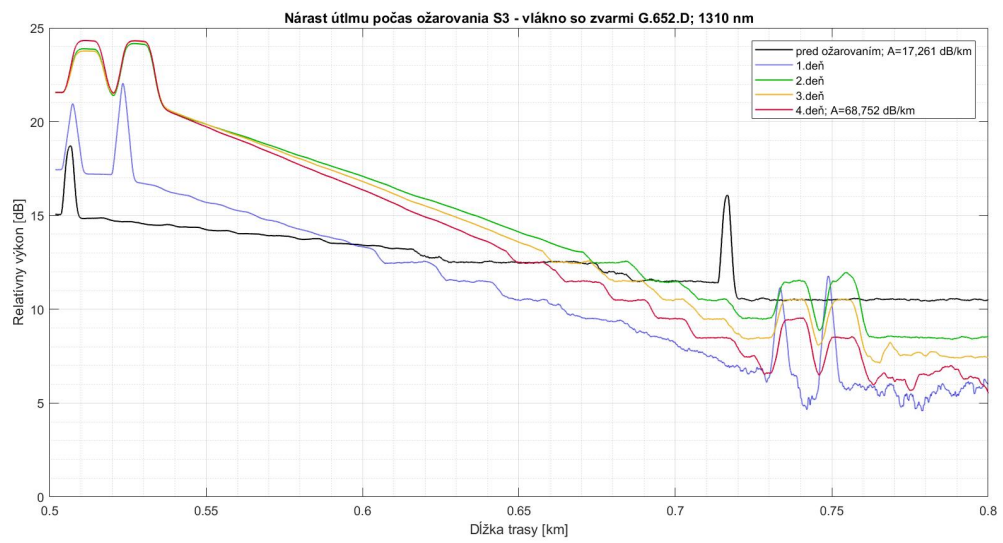
Obr. 35: Vlákno S1 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.



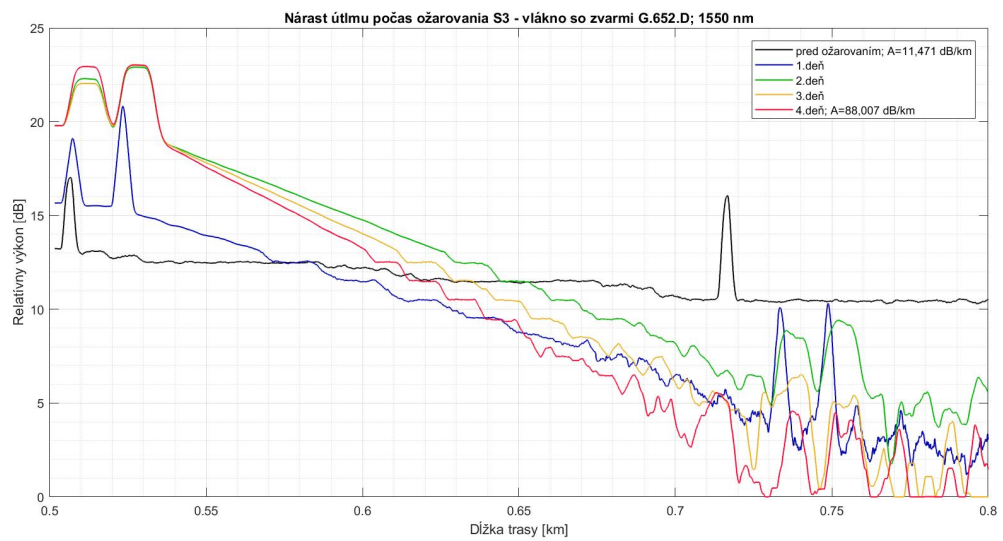
Obr. 36: Vlákno S2 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.



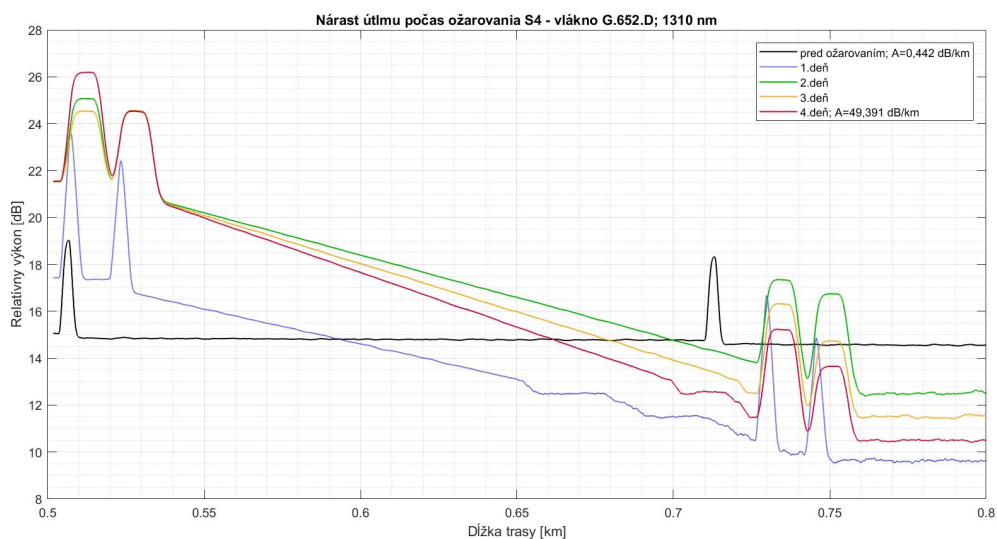
Obr. 37: Vlákno S2 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.



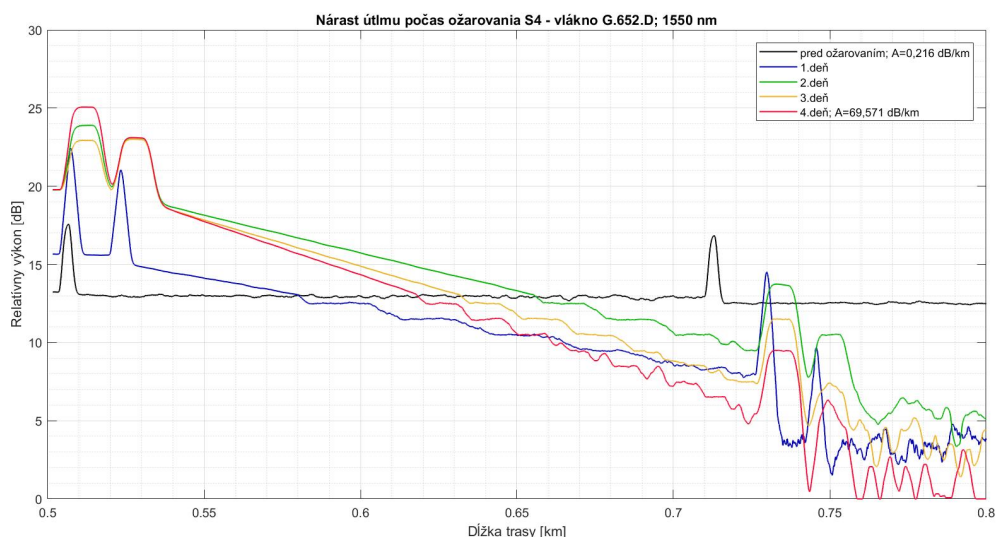
Obr. 38: Vlákno S3 počas ožarovania, $\lambda=1310$ nm.



Obr. 39: Vlákno S3 počas ožarovania, $\lambda =1550$ nm.



Obr. 40: Vláknó S4 počas ožarovania, $\lambda = 1310$ nm.



Obr. 41: Vláknó S4 počas ožarovania, $\lambda = 1550$ nm.

Hodnoty útlmu z merania OTDR ukazujú nárast útlmu v rámci jednotlivých dní ožarovania. Vlákná bol merané v oboch smeroch pri každom meraní. Grafy (obr. 34 - 41), predstavujúce zmeny vyvolané na ožarovanom vlákne S1 až S4, sú prekreslené pomocou softwaru Matlab. Ako zdrojové dáta pre ne slúžia hodnoty z uloženým námerov. Spracovanie vzoriek získaných z OTDR merania je prostredníctvom funkcie pre výpočet pohyblivého priemerovacieho okna. Na každom grafe (obr. 34 - 41) je päť kriviek, zobrazujúcich relatívnu výkonovú úroveň v dB v určitej vzdialenosti na meranej trase. Krivky predstavujú jednotlivé dni, počas ktorých bolo vlákno vystavené ožarovaniu. Prvý námer je námerom vzorky vlákna, dĺžky cca 200 m, kde

dominantným prvkom sú útlmy na začiatku a vo vzdialenosti blízkej 0,53 km až 0,73 km z celej meranej trasy, kedy sa jedná o odraz na konektorovej spojke vlákien predradného a zaradného. Pri ďalších krivkách na grafe je na meranej trase, v dôsledku použitia prepojovacích vlákien dĺžky 15 m, tento odraz akoby zdvojený, pretože sa jedná o pridanie ďalšej spojky na oboch koncoch meraného vlákna.

Špecifické je vlákno S3, ktoré bolo upravené pridaním zvarov s odstupom 10 m na celkovej dĺžke 200 m. Už z prvého námeru je vidieť, že vlákno je zatažené vyšším útlmom, v dôsledku nedokonalosti jednotlivých zvarov.

Z dát je možné hovoriť o tom, že meranie na vlnovej dĺžke 1550 nm je citlivejšie pre pozorovanie daného vplyvu na vlákno. Jedná sa o dôsledok radiačných strát, IR strát a vplyvu parametra MFD, ktorý je závislý na vlnovej dĺžke. Pre vlnovú dĺžku o vyšších hodnotách je hodnota parametra MFD taktiež vyššia a preto je i pozorovaný vplyv pôsobiaceho radiačného žiarenia gama zreteľnejší, dôsledok Comptonovho javu.

6.3.1 Merania relaxácie

Meranie relaxácie prebiehalo v rámci pracoviska Ústavu jaderného výskumu. Po ukončení merania v ožarovni sa valec spolu s meracím systémom presunul mimo priestoru ožarovne (obr. 42).

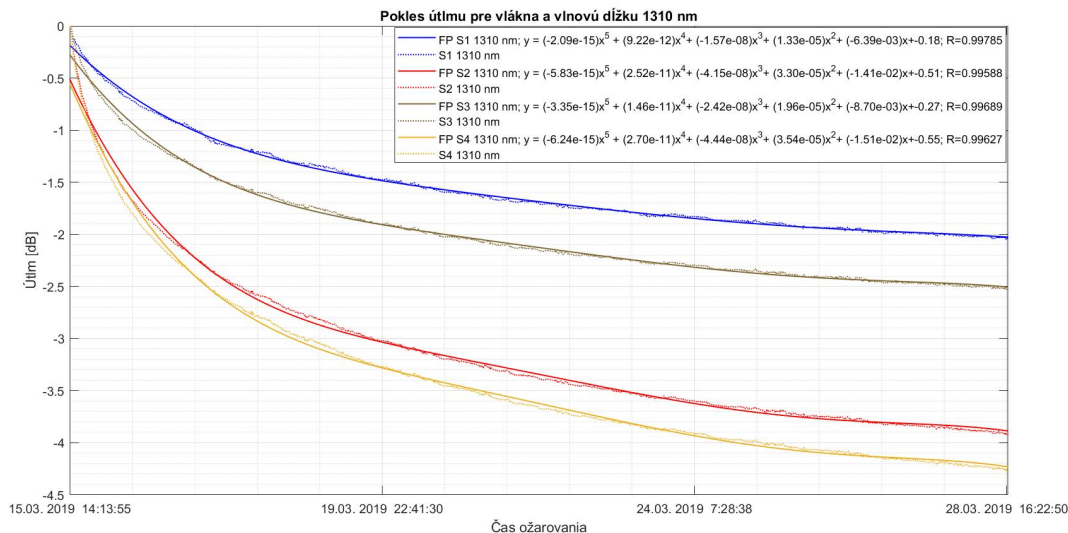


Obr. 42: Presunutie merania z ožarovne do laboratória.

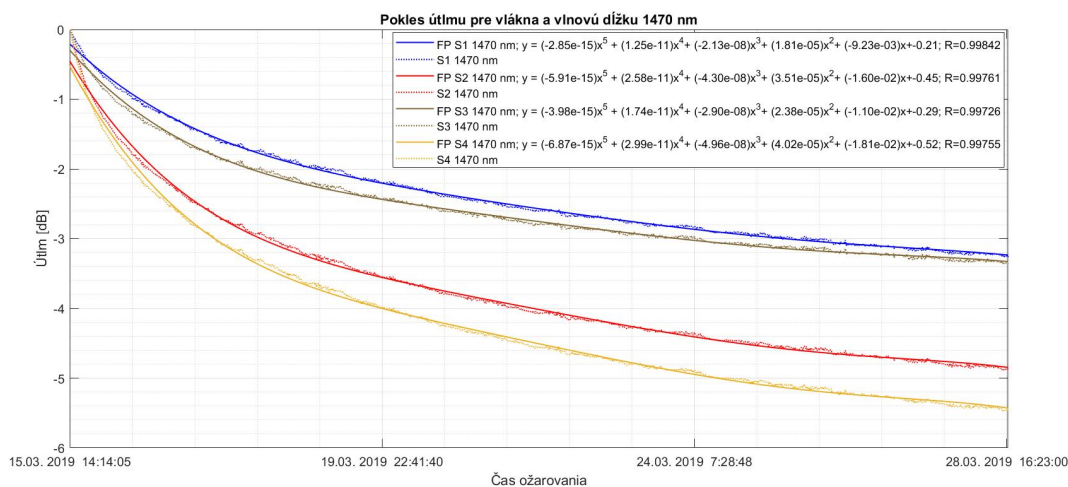
Všetky vláknové vzorky boli opätovne premerané pomocou OTDR a to priamo prepojením meracieho systému a vzoriek bez prepojovacích vlákien.

Meranie prebieha 14 dní a záverom by malo byť porovnanie hodnôt útlmu na vláknach pred relaxáciou a po relaxácii. Predpokladom je rastúca výkonová tendencia a nárast priepustnosti vo vlákne - výkon narastá.

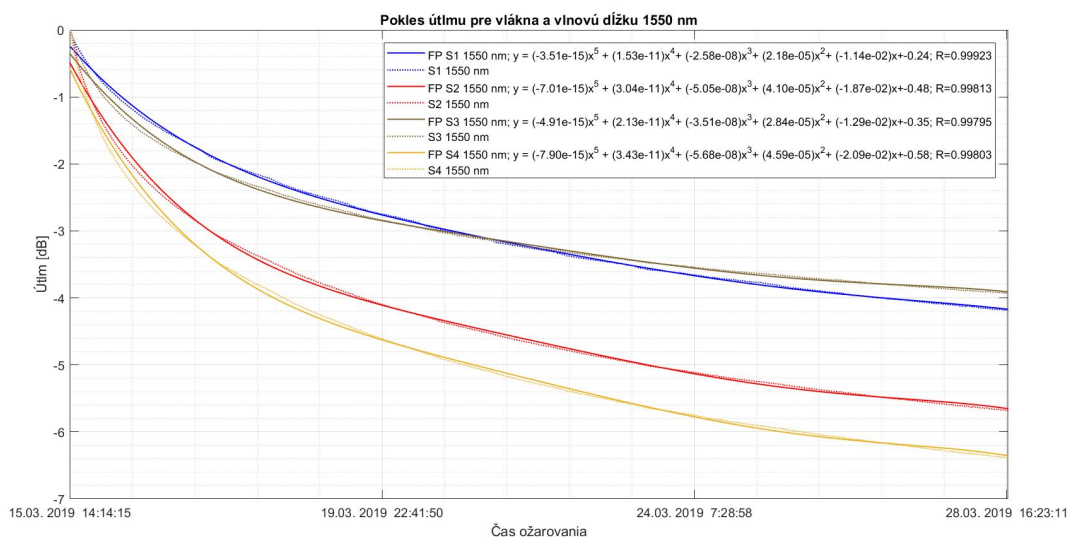
Meranie bolo spustené v čase po ukončení procesu ožarovania, počas 14 dní bolo vytvorených celkom 114 súborov, v každom sa nachádzalo 540 záznamov a pre jedno merané vlákno a vstupnú vlnovú dĺžku 27 hodnôt. Jedná sa o záznam za 6 hodín merania.



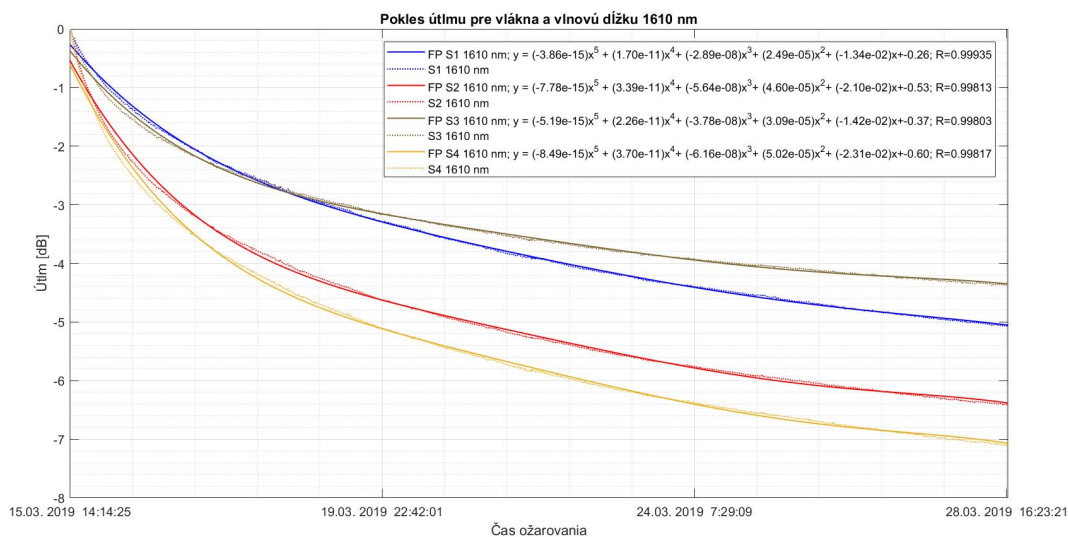
Obr. 43: Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1310 nm.



Obr. 44: Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1470 nm.



Obr. 45: Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1550 nm.



Obr. 46: Pokles útlmu pre všetky merané vlákna pre vlnovú dĺžku 1610 nm.

Porovnanie hodnôt výkonu na začiatku merania, pred relaxáciou materiálu a po 14 dňoch následného merania je uvedené v tabuľke.

Tabuľka 10: Porovnanie výkonu počas fáz merania.

Vlákno/Vlnová dĺžka [nm]	Výkon [mW] (začiatok merania)				
	S1	S4	S3	S4	S5
1310 H	0,5699	0,5442	0,1789	0,3925	0,8065
1470 H	0,6801	0,6788	0,3101	0,5688	0,9535
1550 H	0,6275	0,6580	0,3245	0,5530	0,8983
1610 H	0,4251	0,4672	0,2441	0,3896	0,6427
	Výkon [mW] (pred relaxáciou)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1310 H	0,1314	0,2020	0,0468	0,1173	0,7819
1470 H	0,0385	0,1477	0,0326	0,0764	0,9299
1550 H	0,0106	0,1066	0,0211	0,0478	0,9004
1610 H	0,0022	0,0598	0,0107	0,0237	0,6492
	Výkon [mW] (po relaxácii)				
	S1	S2	S3	S4	S5
1310 H	0,2133	0,3668	0,1275	0,2945	0,7905
1470 H	0,0835	0,3271	0,1184	0,2419	0,9413
1550 H	0,0288	0,2709	0,0952	0,1831	0,9126
1610 H	0,0074	0,1695	0,0573	0,1083	0,6624

Vlákno S5 je referenčné, hodnoty výkonu by mali byť ustálené. Dôležité je spomenúť vplyv okolitej teploty, ktorej zmeny by mohli viesť ku kolísaniu vstupnej hodnoty výkonu. Referenčné vlákno by v tom prípade malo svoju výkonovú krivku ovplyvnenú parametrom teploty. V prílohe je teplotný záznam prostredia, v ktorom bol umiestnený merací prístroj. (Príloha C.3) Je však zrejmé z výstupných hodnôt výkonu pre referenčné vlákno, že k takýmto výkyvom nedochádzalo pri oboch fázach merania a rovnako to i potvrdzujú priložené teplotné záznamy. Teplotné zmeny okolia nemali výrazný vplyv na priebeh merania počas ožarovania a ani počas merania relaxácie.

Tabuľka 11: Porovnanie hodnôt útlmu počas oboch fáz merania, ožarovaní a relaxácii materiálu.

	Útlm [dB] začiatok merania)			
Vlákno/Vlnová dĺžka [nm]	S1	S4	S3	S4
1310 H	1,508	1,709	6,541	2,174
1470 H	1,467	1,476	4,878	2,107
1550 H	1,558	1,352	4,422	2,243
1610 H	1,785	1,386	4,204	3,127
	Útlm [dB] po ožarovaní			
Vlákno/Vlnová dĺžka [nm]	S1	S4	S3	S4
1310 H	9,386	8,069	15,636	11,623
1470 H	15,124	9,639	17,119	14,553
1550 H	20,634	10,845	18,831	17,171
1610 H	25,938	1,072	20,365	19,458
	Útlm [dB] (pred relaxáciou)			
Vlákno/Vlnová dĺžka [nm]	S1	S4	S3	S4
1310 H	7,747	5,877	12,225	8,238
1470 H	13,835	7,992	14,551	10,852
1550 H	19,282	9,267	16,305	12,748
1610 H	24,677	10,359	17,848	14,378
	Útlm [dB] (po relaxácii)			
Vlákno/Vlnová dĺžka [nm]	S1	S4	S3	S4
1310 H	5,690	3,335	7,922	4,288
1470 H	10,521	4,591	9,002	5,902
1550 H	15,015	5,275	9,818	6,976
1610 H	19,491	5,920	10,629	7,864

Hodnoty z tab. 11 je možné porovnať s hodnotami v tab. 9, vložný útlm z meraní metódou OTDR pre vlnové dĺžky 1310 nm a 1550 nm by mal byť blízky hodnotám pre vlnové dĺžky z meraní pred relaxáciou. Záznam z meraní zodpovedá hodnotám pred relaxáciou a prípadný rozdiel, ktorý vznikol, je možné interpretovať ako pokles vzniknutý po dobu presunu meracieho systému a vzoriek po opätovné spustenie. Takýto pokles bol pozorovaný i počas ožarovania pri prerušení.

Útlm počas relaxácie klesá, po uplynutí stanovenej doby 14 dní sú hodnoty poklesu útlmu pre jednotlivé vlákna rozdielne. Je možné tvrdiť, že pre vzorky S3 a S4 je pokles útlmu vyšší a to z dôvodu, že tieto vlákna majú na sebe sekundárnu ochranu, zatiaľ čo vlákna S1 a S2 sú chránené len primárnou ochranou. Vlákno S4 má najvyšší nárast poklesu útlmu pre všetky vlnové dĺžky, podobne je na tom i vlákno S3. Toto vlákno bolo upravené zvarmi a počas ožarovania je vzniknutý útlm podobný S4, štandardnému vláknu a pri relaxácii je dosiahnutý pokles útlmu v

rovnakej miere.

Pokles útlmu je znázornený v grafoch (obr. 43 - 46). Je v nich znázornený pokles útlmu pre jednotlivé vlnové dĺžky. V porovnaní hodnôt na začiatku merania a po štrnásťdňovej relaxácii je pokles útlmu najvýraznejší pre vlnovú dĺžku 1310 nm a vlákna S3 a S4, kedy je pri porovnaní útlmov pokles blízky 75 % zo vzniknutého útlmu počas ožarovania.

Naopak najmenší pokles útlmu je dosiahnutý pre vlákno S1, typu G.655 kedy je pokles blízky 22 % z celkového nárastu útlmu počas ožarovania. Pre všetky vlákna platí, že s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá miera poklesu útlmu. Ďalšie výsledky by mohlo priniesť sledovanie relaxácie po dlhšiu dobu a určiť v akej maximálnej miere hodnoty útlmu klesnú.

7 Záver

Na optické vlákno ako prostredie slúžiace k prenosu signálu sú kladené podmienky lineárnosti, homogenity a izotropie. Avšak tieto podmienky predstavujú ideálny stav. V skutočnosti sú nároky a požiadavky na vlákno natoľko špecifické, či už sa to týka prenosových rýchlostí alebo inštalácie, že sa základné parametre materiálu menia a tým je ich možné vnímať aj ako príznaky istých javov.

Pri prenose a šírení signálu je útlm, predstavujúci straty, považovaný za nežiadúci jav. Jeho nárast daný prostredím obmedzuje prenosovú vzdialenosť.

Pozorovavý bol vplyv radiácie, vystavenie optického vlákna do poľa pôsobenia radiačného žiarenia, pričom dominantným bol práve vplyv gama žiarenia. Podľa predpokladov dochádza k nárastu útlmu na ožarovanom optickom vlákne. Pri meraní je možné porovnať dopad na vybrané vzorky a taktiež sledovať závislosť od vlnovej dĺžky vstupujúcej do vlákna.

Práca spočívala v zhotovení aplikácie a meracieho systému, overení jeho fungovania a praktickým použití. Meranie, ktoré prebiehalo na pracovisku v ÚJV-Řež bolo nevyhnutné pre získanie dát z reálneho prostredia. Už pri návrhu meracieho systému sa zohľadňovali pracovné podmienky v ožarovni, nemennosť konfigurácie merania a automatizované prepínanie medzi vláknami alebo použitie prepojovacích vlákien medzi meracím systémom a ožarovanými vzorkami umiestnenými v studni ožarovača.

Priebeh merania pri ožarovaní optických vlákien prebehlo podľa očakávaní, výsledky preukázali nárast útlmu, ktorý exponenciálne narastal v čase. Z merania boli aplikáciou získané dáta a zaznamenané počas doby dlhšej ako 88 hodín. Meranie bolo prerušované a v každom dni sa metódou OTDR premerali všetky pripojené vlákna. Dáta z OTDR by mali slúžiť na porovnanie oboch trendov námerov. Prerušenie malo dopad na výslednú charakteristiku v grafoch, pretože dokázalo vyvolať vo všetkých vláknach relaxačný efekt. Dochádzalo k tomu, že sa útlm ihneď začal vracal k svojim pôvodným hodnotám. Výkonová hodnota na výstupe sa zdvihla, akonáhle nedochádzalo k ožarovaniu pri spustení aplikácie.

Meranie relaxácie, ktoré bolo druhou sledovanou fázou preukázalo, že materiál vlákna po prerušení vplyvu žiarenia a vystaveniu elektromagnetickému poľu žiariča je schopný regenerácie. Počas merania nastal postupný nárast výkonu na výstupe optických vlákien. Proces sledovania relaxácie trval 14 dní mimo ožarovne a bez prerušenia. Počas tohto intervalu bol predpokladaný pokles útlmu, ktorý mal viesť k ustáleniu hodnôt, a to v miere, akou je stanovený pre požiadavky merania. Priebeh relaxácie je možné sledovať až po stanovenú mieru ustálenia hodnoty. Celkový záznam dát je pochopiteľne väčší v porovnaní s výstupom z merania ožarovania v prvej fáze. Analýzou je možné porovnať pokles útlmu počas intervalu 14 dní a zmenu v rámci kratšej periódy. Pri porovnaní útlmových charakteristík je zmena hodnoty útlmu, ktorý sa prejavoval počas ožarovania voči hodnote po 14 dnoch relaxácie pre jednotlivé vlnové dĺžky blízky poklesu v rozsahu 2,1 až 7,2 dB, čo závisí na type vlákna a prenosovej vlnovej dĺžke (tab. 11).

Merací systém sa spolu s navrhnutou aplikáciou ukázali ako funkčný celok sledovania a zaznamenávania hodnôt výkonu na výstupe pripojených vlákien. Medzi dôležité vlastnosti, ktorými systém disponuje, je schopnosť pripojenia až ôsmich vlákien a automatické prepínanie medzi výkonovou hodnotou na vstupe. Je prínosom pre požiadavku dlhodobého merania a taktiež je možná konfigurácia merania s nastavením intervalu medzi námermi. Čo sa týka spracovania dát, súbory, ktoré sa ukladajú štandardne na disk je možné odosielať prostredníctvom mailu, a to už počas merania.

Záverom však je i fakt, že počas merania sa dali vysledovať možnosti ako zlepšiť merací systém a aplikáciu. Pokiaľ sa jedná o merací systém, prvým zlepšením by bolo pridanie tretieho optického prepínača za účelom redukovať stratu vznikajúcu na deliči, ktorý sa pripája pred detektor. Tým, ako bolo meranie nakonfigurované, táto nevýhoda nemala vplyv. No strata výkonu na výstupe by sa redukovala a hodnoty by sa pohybovali rádovo v inej miere.

Pre ďalšiu prácu s aplikáciou je potrebné zvážiť do budúcnosti jednotlivé funkcie, ktoré sa nevyužili pri meraní. Možno by bolo upraviť zber dát do súboru s nastaviteľnými parametrami pre jeho vytvorenie a taktiež je možné ďalej rozširovať funkcie analýzy meraných hodnôt v reálnom čase merania alebo dodatočného spracovania pri otvorení už existujúcich záznamov. Prioritou bolo zhotovenie funkčného celku s ohľadom na priebeh merania a pri konfigurácii sa použili len nevyhnutné funkcie. Je potrebné zvážiť možnosť rozšíriteľnosti aplikácie, aby sa nenarušila už vytvorená logika samotného merania. Funkcie, ktoré slúžia na zobrazenie v grafe a jeho prekresľovanie by mali byť funkčné bez zásahu do meracieho procesu, a s tým je spojený kvalitný návrh programovej časti. Zatiaľ je možné potvrdiť, že systém s aplikáciou splnil nároky na meranie. Prínos práce predstavujú výsledky v podobe získaných dát a útlmové charakteristiky vybraných optických vlákien. Navyše sa merací systém použil v prostredí Ústavu jaderného výskum ŘEŽ, v ktorom prebehlo testovanie optických vlákien, a do budúcnosti môže slúžiť ako základ ďalšieho skúmania vplyvu radiačného žiarenia na útlmové parametre optických vlákien.

Literatúra

- [1] CABALKA, Martin. Fyzikální podstata ozařování, *text ÚJV*, Praha, 2019.
- [2] Elektrotechnika. *Měření optických vláken a optických kabelových tras*. [online]. [cit. 06.04.2019]. Dostupné z: [https : //publi.cz/books/185/14.html](https://publi.cz/books/185/14.html).
- [3] EMSLIE, Chris. Chapter 8 - Polarization Maintaining Fibers. In: *Specialty Optical Fibers Handbook*. Academic Press, 2007, s. 243-277. ISBN 9780123694065.
- [4] FILKA, Miloslav. *Optické sítě v telekomunikacích*. Dostupné z: [https : //vut – usb.cz/predmet – opticke – site – 33](https://vut-usb.cz/predmet-opticke-site-33).
- [5] ISO/IEC 11801. *International standard - Information technology – Generic cabling for customer premises*. ed. 2, 2002-09. Switzerland, Geneva: IEC, 2002.
- [6] ITU-T G.652. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ed. 9. Switzerland, Geneva: ITU, 2017.
- [7] ITU-T G.655. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ed. 5. Switzerland, Geneva: ITU, 2010.
- [8] JANOVSÝ, Marek. *POF - Polymérová optická vlákna*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [9] KAKUTA Tsunemi, SHIKAMA Tatsuo, NARUI Minoru, SAGAWA, Tsutomu. Behavior of optical fibers under heavy irradiation. In: *Fusion Engineering and Design*. 1998. s. 201-205. ISSN 0920-3796.
- [10] KUCHARSKI, Maciej. *Optická vlákna* [online]. [cit. 01.04.2019]. Dostupné z: [https : //elektrika.cz/static/amper2010/data/files/3.pdf](https://elektrika.cz/static/amper2010/data/files/3.pdf).
- [11] LÁTAL, Jan KOUDELKA, Petr. *Měření v PON Skriptá*. Ostrava: VŠB-TUO, 2011. 89 s. vid. 1. Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava.
- [12] MOLNÁR, Peter. *Príprava a testovanie strieborných imobilizovaných nanočástíc k SERS spektroskopii biomolekul*. Praha, 2006. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikálna fakulta.
- [13] Ochrana optického vlákna. *ELUC* [online]. 2014. [cit. 01.04.2019] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/826>.
- [14] Ochrana optického vlákna. *ELUC* [online]. 2014. [cit. 01.04.2019] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/838>.

- [15] Optical cables and systems. *ITU-T Manual 2009. International Telecommunication Union*, 2010.
- [16] Optické káble. *VUKI* [online]. ©2018. Dostupné z: [https : //www.vuki.sk/sites/default/files/tmp/2_vlastnosti_opt_vlakien0.pdf](https://www.vuki.sk/sites/default/files/tmp/2_vlastnosti_opt_vlakien0.pdf).
- [17] OVSENÍK, Luboš. *Prenosové médiá* [online]. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 2019 [cit. 01.04.2019] Dostupné z [https : //data.kemt.fei.tuke.sk/PM_PS_Prenosove_media/Prednasky/Pr06/Pr06_PM2018.pdf](https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM_PS_Prenosove_media/Prednasky/Pr06/Pr06_PM2018.pdf).
- [18] PACÁK, Karel. *Průmyslový křemen*. Praha, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Přírodovědecká fakulta.
- [19] PÁPEŠ, Martin a JAROŠ, Jakub. *Optické komunikace II*. Skriptá, Ostrava.
- [20] PERECAR Fratisek, LATAL Jan, BEDNAREK Lukas, HAJEK Lukas, HRUBY David, VASINEK Vladimir, NEDOMA Jan a JAROS Jakub. The behavior of the geometrical parameters of optical beam of optical passive components under the long time thermal load. *Proc. SPIE 10603, Photonics, Devices, and Systems VII, 106030S (1 December 2017)*. [cit. 08.04.019]. Dostupné z: doi: 10.1117/12.2292422.
- [21] PLAČEK, Vít, HAVRÁNEK, Petr, CABALKA, Martin, KRONĎÁK, Martin a ŠARŠOUNOVÁ, Zuzana. Metodika zrychleného stárnutí fotonických komponent pro JE. *Příprava expozičních experimentů*, Praha: ÚJV Řež, a. s., 2018.
- [22] PONIŠT, Dávid. *Návrh a realizace automatizovaného měřicího systému pro stárnutí optických vláken*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [23] RUSNAČKO, Juraj. *Zobrazování multimódovými optickými vlákny*. Brno, 2014. Bakalářska práce. Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta.
- [24] TRICKER, Ray. *Optoelectronics and fiber optic technology*. Great Britain: Biddles Ltd, 2002. s.319.
- [25] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 2009. ISBN 978-80-7368-669-7.
- [26] ULLMANN, Vojtěch. Ionizující zařízení, *Jaderná a radiační fyzika*[online]. Dostupné z: [http : //astronuklfyzika.sweb.cz/JadRadFyzika6.htm](http://astronuklfyzika.sweb.cz/JadRadFyzika6.htm).
- [27] VAŠINEK, Vladimír. *Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: VŠB-TUO, 2014. 119 s. vid. 1. ISBN 978-80-248-3675-1.

- [28] Vlastnosti optických vláken. *Optoelektronika, cvičenia* [online]. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky. [cit. 01.04.2019]. Dostupné z: [https :
//data.kemt.fei.tuke.sk/OEOptoelektronika/_materialy/Cvicenia/Cv05/](https://data.kemt.fei.tuke.sk/OEOptoelektronika/materialy/Cvicenia/Cv05/).
- [29] ŽÁČEK, Martin. *Nelineární charakter optického prostředí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [30] KONEČNÁ Zuzana, PLAČE Vít, a HAVRÁNEK, Petr. Unusual Attenuation Recovery Process After Fiber Optic Cable Irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 266(012005). Dostupné z: doi: 10.1088/1757-899X/266/1/012005.
- [31] LAMPERSKI, Jan. Fiber loss mechanisms. *Poznan University of Technology*[online]. 2005. [cit. 15.04.2019]. Dostupné z: [http :
//www.invocom.et.put.poznan.pl/ invocom/C/P1 –
9/swiatlowody_en/p1 – 1_2_2.htm](http://www.invocom.et.put.poznan.pl/invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_2_2.htm).
- [32] Fiber Cabling. How Does Fibre Optic Loss Occur. *Fiber Optic Equipment Solutions*[online]. 2016. [cit. 15.04.2019]. Dostupné z: [http://www.fiber-optic-equipment.com/how-does-fiber-
optic-loss-occur.html](http://www.fiber-optic-equipment.com/how-does-fiber-optic-loss-occur.html).
- [33] ISO/IEC 14763-3. *International standard - Information technology – Generic cabling for customer premises*. ed. 2, 2014-06. Switzerland, Geneva: IEC, 2014.

A Aplikácia

A.1 Zdrojoý kód aplikácie

A.2 Verzia aplikácie

A.3 Konfigurácia merania

B Dokumentácia k použitým prístrojom

C ÚJV - Řež

C.1 Fyzikální podstata ozařování

C.2 Dáta z meraní

C.3 Záznam teploty